



УДК: 533.537

Акбаржон АБДУВАЙТОВ,

ТГТУ, доцент кафедры «Общая физика»

E-mail: akbarjon.abduvayitov@gmail.com

Дилноза ТАШМУХАМЕДОВА,

ТГТУ, профессор кафедры «Технология производства электронных аппаратов»

E-mail: d.ftmet@gmail.com

Хуришид БОЛТАЕВ,

ТГТУ, доцент кафедры «Общая физика»

E-mail: khurshid.boltaev@gmail.com

Балтоходжа УМИРЗАКОВ,

ТГТУ, профессор кафедры «Общая физика»

E-mail: be.umirzakov@gmail.com

ПОЛУЧЕНИЕ УЛЬТРАТОНКИХ КОНТАКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ БИНАРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Аннотация

Впервые с использованием метода низкоэнергетической ионной бомбардировки на поверхности CdS получены ультратонкие омические контакты. Изучены профили распределения атомов контактирующего металла (никеля) по глубине чистого CdS и CdS, бомбардированного ионами Ba⁺ и Ar⁺. Показано, что ионная бомбардировка приводит к уменьшению приконтактного (переходного) слоя в два и более раза и составляет ~ 100 – 120 Å. При этом удельное сопротивление ρ этого слоя не превышало 2 – 2,5 мкОм·см. Уменьшение толщины переходного слоя и ρ объясняется образованием при ионной бомбардировке на поверхности CdS тонкого (30 – 40 Å) металлического слоя.

Ключевые слова: омический контакт, ионная бомбардировка, удельное сопротивление, профиль распределения.

BINAR YARIM O'TKAZGICHLAR YUZASIDA ULTRA YUPQA KONTAKTLARNI OLISH

Аннотация

Birinchi marta kichik energiyali ionlarni bombardimon qilish usuli yordamida CdS yuzasida ultra yupqa omik kontaktlar olindi. Toza CdS va Ba⁺, Ar⁺ ionlari bilan bombardimon qilingan CdS tarkibidagi metall (nikel) atomlarini chuqurlik bo'yicha taqsimoti o'rganildi. O'tish qatlamining (kontakt soxasi) qalinligi ion bombardimon qilinganda ikki va undan ko'p marta kamaygani, ya'ni 100 - 120 Å ni tashkil qilishi ko'rsatildi. Shu bilan birga, bu qatlamning qarshiligi (ρ) 2–2,5 мкОм·см dan oshmadi. O'tish qatlami qalinligi va ρ ning kamayishi ion bombardimonida CdS yuzasida yupqa (30–40 Å) metall qatlam hosil bo'lishi bilan izohlanadi.

Kalit so'zlar: omik kontakt, ion bombardimoni, solishtirma qarshilik, profil bo'yicha taqsimot.

OBTAINING ULTRATHIN CONTACTS ON THE SURFACE OF BINARY SEMICONDUCTORS

Abstract

For the first time, ultrathin ohmic contacts have been obtained on the surface of CdS using the method of low-energy ion bombardment. The distribution profiles of atoms of the contacting metal (nickel) over the depth of pure CdS and CdS bombarded with Ba⁺ and Ar⁺ ions have been studied. It is shown that ion bombardment leads to a decrease in the near-contact (transition) layer by a factor of two or more and is ~ 100 – 120 Å. At the same time, the resistivity ρ of this layer did not exceed 2–2.5 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$. The decrease in the thickness of the transition layer and ρ is explained by the formation of a thin (30–40 Å) metal layer on the CdS surface during ion bombardment.

Keywords: ohmic contact, ion bombardment, resistivity, distribution profile.

Введение. Монокристаллические образцы и плёнки A²B⁶, в особенности CdS и многослойные гетероструктуры на их основе широко используются в создании различных приборов микро-, нано- и оптоэлектроники, в том числе солнечной энергетики [1-4]. В настоящее время хорошо изучено влияние термообработки, лазерного отжига, СВЧ-обработок, ионной и электронной бомбардировки, на структуру, состав и оптические свойства образцов A²B⁶, а также процессы взаимодиффузии атомов на границе раздела многослойных ПДП и МДП-систем, созданных на основе этих полупроводников [5-14]. В частности, в работах [11,12] имплантацией ионов Ba⁺ в CdTe и CdS на их поверхности и вблизи неё получены нанокристаллы и слои типа Cd_{1-x}Va_xTe и Cd_{1-x}Va_xS.

Основной проблемой при создании электронных приборов на основе нанопленочных ПДП и МДП структур является создание надежных ультратонких контактов. Основные требования к омическим контактам: удельное сопротивление ρ_k омического контакта должно быть $\leq 10^{-2}$ Ом·см; малая толщина переходного слоя металл-кремний; морфологическое совершенство пленки и неизменность фазового состава на всей площади контакта; стабильность свойств контактов в процессе изготовления и эксплуатации.

Для получения сверхтонких контактов на наноразмерных структурах используется ряд методов фазового расслоения; метод низкоэнергетического ионного легирования; метод осаждения многослойных композиций. Независимо от метода создания контакта значение ρ_c зависит от уровня легирования полупроводника.

Каждый из этих методов обладая определенными преимуществами не лишены и недостатков. Кроме того, эти методы использованы в основном для нанопленок кремния. В работе [15] для получения надежных омических контактов на Si использован метод имплантации ионов Ba^+ с вариацией энергии E_0 в диапазоне от 5 до 0,5 кэВ. Во всех случаях доза ионов составляла $\sim 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Для кристаллизации ионно-имплантированных слоев и получения силицидов бария проводился постимплантационный прогрев при $T \approx 100 - 1100 \text{ K}$. При этом ρ для $BaSi_2$ составляет $\sim 50-100 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$. Затем на поверхность силицида напыляли атомы контактирующего металла Ni. Глубина проникновения Ni в Si уменьшается 5-6 раз и составляла $\sim 100 \text{ \AA}$. Такие исследование в случае бинарных полупроводников не проводились.

В данной работе мы попытались получить тонкий омический контакт на поверхности CdS, методом ионной бомбардировки.

Методика проведения экспериментов. Объектами исследования являлись монокристаллические пленки CdS (111) n-типа с толщиной $\sim 1 \text{ мкм}$, выращенные на поверхности диэлектриков (силикатных стекол), методом термического испарения в вакууме $\sim 10^{-6} \text{ мм рт.ст.}$ [16]. Эти образцы установлены на универсальную сверхвысоковакуумную ($P = 10^{-9} \text{ мм рт.ст.}$) установку, где проводились все технологические операции (прогрев, напыление атомов Ni, ионная бомбардировка и исследования состава и структуры исследуемых образцов). Для получения сверхтонких контактов на поверхности пленок CdS использовался метод низкоэнергетической ионной бомбардировки. Исследования проводились с использованием методов оже-электронной спектроскопии (ОЭС), ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС). Профили распределения атомов по глубине определялись методом ОЭС в сочетании с послойным травлением поверхности ионами Ag^+ с $E_0 = 2 \text{ кэВ}$ под углом $5-10^\circ$ относительно поверхности образца.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Омический контакт характеризуется удельным сопротивлением, значение которого определяется через полное сопротивление R_t [17, 18].

$$R_t = \frac{\rho_n}{\pi d} \cdot f \cdot g^{-1} (4h/d) + 4\rho_c/\pi d^2 + R_0 \quad (1)$$

где, ρ_n – удельное сопротивление полупроводниковой пленки, h – толщина пленки, d – диаметр кругового контакта, f – частота генерации, g – активная межэлектронная проводимость, ρ_c – удельное сопротивление контакта, R_0 – сопротивление тыльного контакта.

В контактах металл-полупроводник с низким уровнем легирования $N_D \leq 10^{17} \text{ см}^{-3}$ преобладает термоэлектронная компонента, а высоким уровнем легирования $N_D \geq 10^{19} \text{ см}^{-3}$ – туннельная компонента тока. В первом случае значение ρ_c можно определять по формуле:

$$\rho_c = \frac{k}{qA^*T} \exp\left(\frac{q\phi_{\text{вн}}}{kT}\right) \quad (2)$$

где, k – постоянная Больцмана, q – заряд электрона, A^* – эффективная постоянная Ричардсона, $\phi_{\text{вн}}$ – высота барьера Шоттки.

Из формулы (2) следует, что в случае полупроводников с низким уровнем легирования для получения малых ρ_c нужно изготовить контакт с малой высотой барьера.

Во втором случае ρ_c определяются по формуле

$$\rho_c \approx \exp\left[\frac{2\sqrt{\epsilon_S m^*}}{h} \cdot \left(-\frac{\phi_{\text{вн}}}{\sqrt{N_D}}\right)\right], \quad (3)$$

где, m^* – эффективная масса электрона, ϵ_S – диэлектрическая постоянная пленки, N_D – концентрация примесных уровней.

Анализ формул (2) и (3) показывает, что при $N_D < 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ток обусловлен термоэмиссией и значение ρ_c почти не зависит от уровня легирования, а при $N_D > 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ρ_c определяется, в основном, туннельными процессами и быстро уменьшается по мере повышения степени легирования.

Для получения омического контакта нами использовались два метода: в первом случае пленки CdS предварительно имплантировались ионами Ba^+ с дозой насыщения, а во втором случае бомбардировались ионами Ag^+ с дозой $D \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. При имплантации ионов Ba^+ в CdS с $E_0 = 1 \text{ кэВ}$ высокой дозой ($D \approx D_n \approx 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) поверхностные слои с толщиной 40-50 \AA обогащались атомами Cd+Me, т.е. происходила металлизация поверхности. После напыления на поверхность ионно-имплантированного образца Ni получили надежный омический контакт. Толщина поверхностного слоя (глубина проникновения Ni) не превышала 50-70 \AA (рис. 1). Однако после прогрева ионно-имплантированного CdS до $T \approx 900 \text{ K}$ на поверхности образовалась монокристаллическая пленка $Cd_{0.6}Ba_{0.4}S$ (рис. 1). ρ_c этой системы была высокая и составляла $\geq 100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и после напыления Ni образовался переходной слой с толщиной $\sim 400-500 \text{ \AA}$, т.е. этот метод не дал необходимого эффекта.

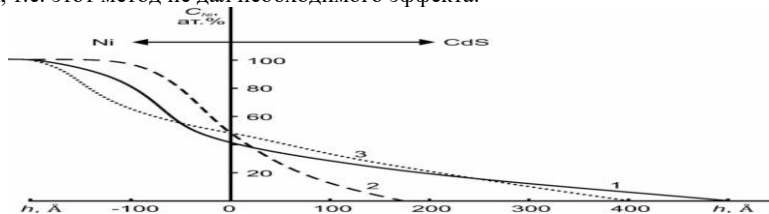


Рис. 1. Профили распределения Ni по глубине h : 1 – CdS (111); 2 – CdS, имплантированный ионами Ba^+ с $E_0 = 1 \text{ кэВ}$, 3 – после прогрева при $T = 800 \text{ K}$ ионно-имплантированного CdS в течении 30 мин. Толщина пленки Ni составляла $\sim 500 \text{ \AA}$.

Во втором случае мы использовали метод бомбардировки CdS ионами Ag^+ . Наиболее оптимальным был следующий режим: угол падения ионов Ag^+ на поверхность $\sim 40-45^\circ$, энергия ионов $E_0=3$ кэВ, доза ионов $D=2 \cdot 10^{17}$ cm^{-2} . После бомбардировки поверхность с толщиной 40-50 Å покрывалась атомами Cd (80 – 90 ат.%). После прогрева при $T = 800$ К происходила полная кристаллизация разупорядоченных слоев CdS, а поверхностная концентрация Cd составляла $\sim 70 - 75$ ат.%, а S – 25-30 ат.% (рис. 2). Удельное сопротивление этих слоев было $\sim 10^{-3}$ Ом·см. Наличие большого количества Cd обеспечивало хорошую адгезию Ni и формированию хорошего омического контакта с малой толщиной переходного слоя (80-70 Å).

На рис. 3 приведены профили распределения атомов Ni по глубине «чистого» для CdS (кривая 1) и CdS, бомбардированного ионами Ag^+ с $E_0=3$ кэВ и прогретого при $T=800$ К в течение 40 мин. В обоих случаях толщина пленки Ni составляется ~ 1 мкм.

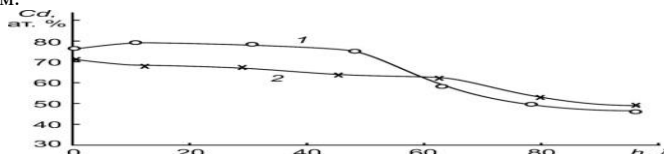


Рис. 2. Зависимость концентрации Cd от глубины для пленки CdS, бомбардированного ионами Ag^+ с $E_0=3$ кэВ при $D=2 \cdot 10^{17}$ cm^{-2} под углом к поверхности $\alpha=40-45^\circ$. 1 – после ионной бомбардировки; 2 – после прогрева при $T=800$ К в течение $t=40$ мин.

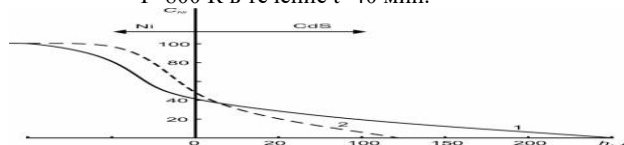


Рис. 3. Профили распределения атомов Ni по глубине 1 – чистой монокристаллической пленки CdS, 2 – пленки CdS, бомбардированной ионами Ag^+ с $E_0=3$ кэВ и отожжённого при $T=800$ К (2) в течение 40 мин

Видно, что в случае ионно-бомбардированного образца, хотя проводился прогрев, глубина проникновения атомов Ni не превышает 130-150 Å. В таблице 1 приведены значение ρ_k и максимальная глубина проникновения Ni для системы Ni-CdS и Ni-ионно-бомбардированный CdS до и после прогрева.

Параметры	Ni-CdS	Ni – Ag^+ \rightarrow CdS, $E_0=3$ кэВ	
		$T=300$ К	$T=800$ К
ρ , мкОм·см	2,3	2,2	2,6
$h_{\text{ни}}$, Å	600	100	150

Таблица 1

Значения ρ_k измерены при комнатной температуре. Видно, что значение ρ_k для всех указанных систем резко не отличается друг от друга. Однако глубина, проникновения Ni отличается в 4 – 5 раза.

Заключение. Таким образом, предварительная бомбардировка CdS ионами Ag^+ позволяет получить ультратонкие контакты на его поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

- Г.С. Хрипунов, В.Р. Копач, А.В. Мериуц, Р.В. Кириченко, Н.В. Дейнеко, ФТП, 45 (1) С.1564 (2011).
- K.R. Murali, M. Matheline, R. John, Chalcogenide Lett, 6 (9) P.483 (2009).
- A.A. Vashchenko, V.S. Lebedev, A.G. Vitukhnovskii, R.B. Vasiliev, I.G. Samatov, JETP Lett, 96, 113 (2012).
- C. Dang, J. Lee, C. Breen, J.S. Steckel, S. Coe-Sullivan, A. Nurmikko, Nature Nanotechnology, 7, 335 (2012).
- А.П. Беляев, В.П.Рубец, В.В.Антипов, ФТП. 39. 2. С.204-206. (2005).
- Ш.А.Мирсагатов, И.Б. Сапаев, ФТП. 48 (10) С.1398-1404. (2014).
- К.А.Свит, Д.Ю.Протасов, Л.Л.Свешникова, А.К.Шестаков, С.А.Тийс, К.С.Журавлев, ФТП, 48 (9) С.1237-1241 (2014).
- Р.А.Редько, С.И.Будзуляк, Д.В.Корбутяк, А.П.Лоцько, Н.Д.Вахняк, Л.А.Демчина, С.М.Калитчук, Р.В.Конаева, В.В.Миленин, Ю.В. Быков, С.В.Егоров, А.Г.Еремеева, ФТП, 49 (7) С.916-919 (2015)
- А.Г.Роках, М.И.Шишкин, В.С. Аткин, ФТП 52. (8) С.853-859 (2018).
- Д.М.Седракян, П.Г.Петросян, Л.Н. Григорян, ЖТФ, 85 (5) С.94-99 (2015).
- Б.Е.Умирзаков, Ж.Ш.Содикжанов, Д.А.Ташмухамедова, А.А.Абдувайитов, Э.А.Раббимов. Письмо в ЖТФ. 2021. Т.47. вып.12. с.3-5. Doi: [10.21883/PJTF.2021.12.51057.18632](https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.12.51057.18632)
- Б.Е.Умирзаков, Д.А.Ташмухамедова, Э.А.Раббимов, Ж.Ш.Содикжанов, А.Н.Уроков, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 12, С.76-80 (2019).
- A.A.Abduvayitov, Kh.Kh.Boltaev, G.A.Rozikov. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2022, Vol. 16, No. 5, pp. 860–863. Doi: [10.1134/S102745102205024X](https://doi.org/10.1134/S102745102205024X)
- Д.А.Ташмухамедова, Б.Е.Умирзаков, М.А. Мирджалилова, Изв. АН. Сер. Физ. 2004. Т.68. № 3. С.424-426.
- Boltaev Kh.Kh., Tashmukhamedova D.A., Umirzakov V.E. Journal of Surface Investigation 2014, 8(2). pp.326-331
- Алиев А.А., Абдувайитов А.А., Рузибаева М.К. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. №5 с.102-105 (2009)
- Walden R.H.et.al. The buried Channel Coupled Device.// Bell. Sist.Tech.J., - 1972. - V.51. - P.180-183.
- Wittmer M. Silicide contacts for shallow junction devices. //Thin Solid Films. - 1983. - V.107. - P.99-110.



UDK: 533.21

Maxfuza ALINAZAROVA,

Namangan viloyati pedagoglarni yangi metodikalarga o'rgatish milliy markazi,

Aniq va tabiiy fanlar metodikasi kafedrasini mudiri, PhD.

E-mail: maxfuzaalinazarova@mail.ru

Fizika-matematika fanlari doktori M.Xudoyberdiyeva taqrizi asosida

QUYOSH ELEMENTLARINING EFFEKTIV FOTOGALVANIK XARAKTERISTIKALARINI VOLT-AMPER XARAKTERISTIKASI NOIDEALLIK KOEFFITSIENTIGA BOG'LANISHI

Аннотация

Ushbu ishda QE larining effektiv tok zichligi va effektiv quvvatlarni effektiv quvvat aniqlanadigan nuqtadagi volt-ampere xarakteristikasini noideallik ko'effitsientiga bog'lanishi nazariy tadqiq qilindi.

Kalit so'zlar: quyosh elementi, qisqa tutashuv toki zichligi, effektiv kuchlanish, effektiv tok zichligi, effektiv quvvat, volt-ampere xarakteristika, noideallik ko'effitsienti, harorat.

RELATIONSHIP OF EFFECTIVE PHOTOVOLTAIC CHARACTERISTICS OF SOLAR ELEMENTS TO COEFFICIENT OF NON-IDEALITY OF VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS.

Annotation

In this work, the connection of effective current density and effective power of QEs to the coefficient of non-ideality of the volt-ampere characteristic at the point where the effective power is determined was theoretically studied.

Key words: solar cell, short-circuit current density, effective voltage, effective current density, effective power, volt-ampere characteristic, non-ideality coefficient, temperature.

СВЯЗЬ ЭФФЕКТИВНЫХ ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОЭФФИЦИЕНТОМ НЕИДЕАЛЬНОСТИ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.

Аннотация

В данной работе теоретически исследована связь эффективной плотности тока и эффективной мощности КЭ с коэффициентом неидеальности вольт-амперной характеристики в точке, где определяется эффективная мощность.

Ключевые слова: солнечный элемент, плотность тока короткого замыкания, действующее напряжение, действующая плотность тока, эффективная мощность, вольт-амперная характеристика, коэффициент неидеальности, температура.

Jahonda so'ngi yillarda yarimo'tkazgichli asboblar fizikasi sohasida yechilishi dolzarb bo'lgan muhim ilmiy muammoldan biri – bu yarimo'tkazgichli QElarining samaradorligini oshirishdan iboratdir. QElarining samaradorligini oshirish uchun birinchi navbatda strukturalarning asosi bo'lgan *r-p*-o'tishning sifati va bunday sifatni baholovchi fizik ko'rsatkichlarni yoritilgan sharoitdagi volt-ampere xarakteristikaning (VAX) noideallik ko'effitsientiga bog'liqligini tadqiq etish zarur. Yarimo'tkazgichli fotoelementlarning asosiy chiqish parametrlari va ularning turli faktorlarga bog'liqlik ifodalari VAXning noideallik ko'effitsientini e'tiborga olgan va tajriba ma'lumotlariga tayangan holda o'rganish dolzarb vazifalardandir. Bugungi kunda jahonda yarimo'tkazgich materiallar negizida yuqori samarali energiya manbalarini yaratish borasida aniq maqsadli ilmiy tadqiqotlarni, jumladan yarimo'tkazgichli fotoelementlarning asosiy chiqish xarakteristikalarining sodda va aniq ifodalarni ishlab chiqish; ularning noideallik ko'effitsientiga bog'liqlik qonuniyatlarini aniqlash; fotogeneratsiyalangan zaryad tashuvchilarning *r-p*-o'tishda samarali ajratilish jarayonini nazariy va amaliy ma'lumotlar asosida optimallashtirish muhim vazifalardan hisoblanadi.

Gidrogenizatsiyalangan amorf kremniy (*a-Si:H*) asosidagi QE larining asosiy xususiyatlari sifatida: ularni katta yuzalarda tayyorlash mumkinligi va bu materialning ishchi qatlamining monokristall yarimo'tkazgichlarinikiga nisbatan optik yutilish ko'effitsienti va fotosezgiriligining katta ekanligini ko'rsatish mumkin. *a-Si:H* ning optik yutilish ko'effitsienti va fotosezgiriligining kattaligi bu material strukturasi tartibsizligi va unda vodorodning mavjudligi bilan belgilanadi. [1; 31-35 b., 2; 41-44 b.] Bu borada maqsadli ilmiy tadqiqotlarni amalga oshirish, jumladan, gidrogenizatsiyalangan amorf kremniy asosli QE larini effektiv fotogalvanik parametrlarini volt-ampere xarakteristikasining noideallik ko'effitsientiga bog'liqligini tahlili qilish va ularni optimallashtirish, ularni samarali ishlash harorat intervalini aniqlash shu sohani dolzarb muammoldan hisoblanadi.

[3; 405-410 b.] ishda U_{si} , j_{qt} va n' lar bir-biriga bog'liq bo'lmashligi va shuning uchun ularni bir-biriga bog'lanishlarini alohida o'rganish mumkin ekanligi ko'rsatilgan.

Yarimo'tkazgichlar asosida tayyorlanadigan Shottki to'siqli QE larining noideallik ko'effitsienti $n \approx 1,0-2,5$ oraliqda, *p-n* va *p-i-n* asosli QE lariniki esa $n \approx 1,0-3,5$ oraliqda yotadi.

[4; 36-40 b.] ishda QE ini fotogalvanik xarakteristikalarini effektiv qiymatlarini aniqlash mumkin bo'lgan ifodalarni oldik. Endi maqsadimiz, bu parametrlarni volt-ampere xarakteristikasining noideallik ko'effitsientiga bog'lanishini tadqiq

qilishdan iborat. [5; 14-16 b.] ishda QE ni j_0 -to'yinish va j_{km} -qisqa tutashuv toki zichliklari, U_{si} - salt ishlash kuchlanishi ham, haroratga bog'lanishini aniqlovchi ifodalarni oldik. [6; 19-22 b.] ishda chiqarilgan xulosalarga tayanib bu parametrlarni quyidagi ko'rinishlarda yozamiz:

$$j_0 = j_{00} \exp\left(-\frac{q\varphi}{k}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right), \quad (1)$$

$$U_{cu} = (U_{cu0} - \varphi) \frac{T}{T_0} + \varphi, \quad (2)$$

$$j_{km} = j_0 \left[\exp\left[\frac{q\varphi}{n'_1 k T_0} \left(\frac{U_{cu0}}{\varphi} - 1 + \frac{T_0}{T}\right)\right] - 1 \right]. \quad (3)$$

Bu ifodalardagi n'_1 -QE ini VAX sini qisqa tutashuv toki aniqlanadigan nuqtasidagi VAX ni noideallik koeffitsienti bo'lib bu kattalikni qiymati haroratni $100K < T < 500K$ intervalida deyarli o'zgarmasligi [7; 61-64 b.] ishda ko'rsatilgan. φ - QE ining potensial to'sig'i balandligi bo'lib, uni juda past bo'lmagan haroratlar uchun quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$\varphi = \varphi_0 - \gamma T. \quad (4)$$

Bu yerda, φ_0 - QE ining $T=0$ K haroratdagi potensial to'sig'i balandligi bo'lib, uni salt ishlash kuchlanishini haroratga bog'lanishini ($U_{si}(T)$), $T=0K$ ga ekstrapolyatsiya qilib aniqlash mumkin [8; 38-41 b.]. γ - potensial to'siq balandligini harorat koeffitsienti bo'lib, yarimo'tkazgichlar uchun uni qiymati 10^{-3} - 10^{-4} V/K oraliqda yotadi. (4) ni (1) - (3) larga qo'yilsa, bu fotogalvanik xarakteristikalarda o'zgaruvchi sifatida faqat harorat qoladi.

QE larni effektiv kuchlanishini, effektiv tok zichligini, va effektiv quvvat zichligini haroratga bog'lanishini aniqlovchi ifodalarni oldingi bobda chiqarilgan xulosalarga ko'ra quyidagi ko'rinishlarda yozamiz:

$$U_{\varphi\phi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{j_{km}}{j_0} \frac{kT}{qU_{cu}} \quad (5)$$

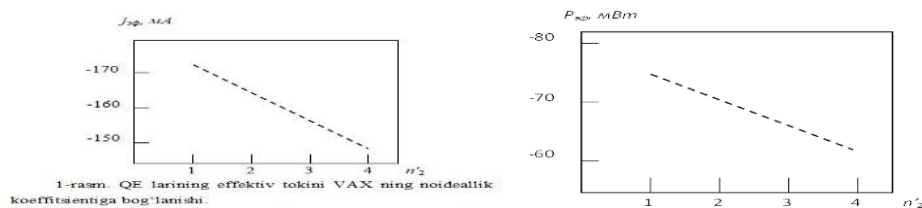
$$j_{\varphi\phi} = j_{km} \left(\frac{n'_2 kT}{qU_{cu}} - 1 - \frac{j_0}{j_{km}} \right) \quad (6)$$

$$P_{\varphi\phi} = \frac{kTj_{km}}{q} \left(1 + \frac{j_0}{j_{km}} - \frac{n'_2 kT}{qU_{cu}} \right) \ln \frac{j_{km}}{j_0} \frac{kT}{qU_{cu}}. \quad (7)$$

[9; 36-40 b.] ishda ko'rdikki, QE larning salt ishlash kuchlanishi VAX ning noideallik koeffitsientiga umuman bog'liq bo'lmaydi. Effektiv kuchlanish esa, QE larning VAX sining effektiv quvvat aniqlanadigan nuqtasidagi VAX ing noideallik koeffitsientiga bog'liq bo'lmaydi, ammo bu parametr uchun kelirib chiqarilgan formulada (5) qisqa tutashuv toki zichligi mavjud bo'lganligi uchun, bu parametr ham VAX ning qisqa tutashuv toki zichligi aniqlanadigan nuqtasida noideallik koeffitsientiga bog'liq bo'ladi. Tok zichligining va quvvatning effektiv qiymatlari esa, QE larning VAX sining effektiv quvvat aniqlanadigan nuqtasidagi VAX ing noideallik koeffitsientiga ham, qisqa tutashuv toki aniqlanadigan nuqtasidagi VAX ing noideallik koeffitsientiga ham, bog'liq bo'ladi.

1-rasmda QE larning effektiv tokini (6) formula yordamida hisoblangan VAX ning effektiv quvvat aniqlanadigan nuqtasidagi VAX ning noideallik koeffitsientiga bog'lanishi keltirilgan. Bu bog'lanish chiziqli bo'lib n_2 ' ni qiymati 1 dan 4 gacha ortib borganda $j_{ef}=(173,8 - 146,48)$ mA oraliqda kamayar ekan. Hisoblashlarni $T_0=273$ K, $T=300$ K, $j_0=9 \cdot 10^{-9}$ A, $\varphi_0=1,12$ V, $U_{si}=\varphi_0/2$ V, $\gamma=5 \cdot 10^{-4}$ V/K va $n_1'=1,00239$ qiymatlar uchun bajarildi.

2-rasmda esa QE larning effektiv quvvatini (7) formuladan olingan VAX ning effektiv quvvat aniqlanadigan nuqtasidagi VAX ning noideallik koeffitsientiga bog'lanishi keltirilgan. Bu bog'lanish ham chiziqli bo'lib noideallik koeffitsienti 1 dan 4 gacha ortib borganda QE larning effektiv quvvati $P_{ef}=(76,6 - 64,54)$ mWt oraliqda kamayar ekan. Hisoblashlarni $T_0=273$ K, $T=300$ K, $j_0=9 \cdot 10^{-9}$ A, $\varphi_0=1,12$ V, $U_{si}=\varphi_0/2$ V, $\gamma=5 \cdot 10^{-4}$ V/K va $n_1'=1,00239$ qiymatlar uchun bajarildi.



1-rasm. QE larning effektiv tokini VAX ning noideallik koeffitsientiga bog'lanishi.

Hisoblashlarni $T_0=273$ K, $T=300$ K, $j_0=9 \cdot 10^{-9}$ A, $\varphi_0=1,12$ V, $U_{si}=\varphi_0/2$ V, $\gamma=5 \cdot 10^{-4}$ V/K va $n_1'=1,00239$ qiymatlar uchun bajarildi.

2-rasm. QE larning effektiv quvvatini VAX ning noideallik koeffitsientiga bog'lanishi.

Bu natijalardan quyidagi xulosani chiqarish mumkin. QE larning effektiv tok zichligi va effektiv quvvatlarni haroratga bog'lanishi uchun keltirib chiqarilgan yangi ifodalar asosida, bu parametrlarni VAX sini noideallik koeffitsientiga bog'lanishini nazariy tadqiq qilindi. Hisoblashlar bu bog'lanishlardan fotoVAX ning noideallik koeffitsienti ortib borishi bilan qisqa tutashuv toki zichligi, effektiv kuchlanish, effektiv tok zichligi va effektiv quvvatlarni juda kuchli kamayishi ko'rsatildi.

Bu natijalardan quyidagi xulosani chiqarish mumkin. QE larning VAXning noideallik koeffitsientini har qanday

ortishi fotogalvanik xarakteristikalarini qiymatlarini kamayishiga olib kelar ekan. Bu esa QE larning FIK ini kamayishiga sabab bo'ladi.

ADABIYOTLAR

1. Галимуллина Э. Э., Абзалилова Ю.Р. Системы повышения эффективности солнечных батарей Альманах современной науки и образования. Тамбов: Грамота, 2016. № 12 (114). С. 31-35.
2. Aliyev R., Alinazarova M., Ikramov R.. Semiempirical A Efficiency Test for solar cells based on AlGaAs - AlGaAs and Si. Applied solar energy vol.52 New York No. 2, 2016. pp. 41-44
3. Икрамов Р., Алиназарова М.. Температурная зависимость коэффициента полезного действия солнечных элементов "Science, research, development philology, sociology and culturology" №5 Collection International Conference. Berlin, 2018 y.- p.405-410.
4. Икрамов Р.Г. Алиназарова М. Исманова О.Т. Ражапов И.Т. Қуёш элементларининг фойдали иш коэффициенти ва фотовольт-ампер характеристикасининг ноидеаллик коэффициенти НамДУ илмий ахборотномаси.- Наманган. 2019 й.-№2.-Б.19-25.
5. Алиев Р., Алиназарова М.А., Икрамов Р.Г., Исманова О.Т. Влияния температуры на эффективные значения фотогальванических характеристик солнечных элементов. IJAEЕ(Russia), № 15, (137) 2013стр. 36-40
6. Алиев Р., Алиназарова М.А., Икрамов Р.Г., Исманова О.Т. Influence of the temperature on efficient importance photo galvanic characteristics of solar elements. Litters in IJAEЕ (Russia), N 3, 2014 14-16.
7. Зайнобиддинов С., Икрамов Р.Г., Алиев Р., Исманова О.Т., Ниязова О., Нуриддинова М.А. Влияние температуры на фотоэлектрические характеристики солнечных элементов из аморфного кремния. Гелиотехника, №3,2003, №3, -с. 19-22.



УДК: 678.278:541.68.63.(615.022)

Ummatjon ASROROV,
O'zbekiston Milliy Universiteti, Fizika fakulteti tayanch doktoranti.
E-mail: ummat.asrorov@mail.ru
Sabitjan INAGAMOV,
Texnika fanlari doktori, professor, Toshkent farmasevtika instituti,

Toshkent Davlat Pedagogika Universiteti dotsenti, f.-m.f.n. E. Q. Qalandarov taqrizi asosida

THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS OF INTERPOLYMER COMPLEXES

Annotation

The thermogravimetric analysis of interpolymer complexes obtained on the basis of sodium-carboxymethylcellulose (Na-KMS) and linear structure polyacrylamide (PAA) was studied in the research work. Theoretical foundations of thermogravimetric analysis are presented. The heat resistance of polymer materials has been studied. The limits of moisture and mass loss of the polymer film under the influence of heat have been determined.

Key words: Thermogravimetry polycomplex (TGA), sodium-carboxymethylcellulose (Na-CMC), polyacrylamide (PAA), polymer, pill, thermal analysis.

ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИНТЕРПОЛИМЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация

В работе проведен термогравиметрический анализ интерполимерных комплексов, полученных на основе натрий-карбоксиметилцеллюлозы (Na-КМС) и полиакриламида линейной структуры (ПАА). Представлены теоретические основы термогравиметрического анализа. Исследована термостойкость полимерных материалов. Определены пределы потери влаги и массы полимерной пленки под воздействием тепла.

Ключевые слова: Термогравиметрия (TGA), карбоксиметилцеллюлоза натрия (Na-КМЦ), полиакриламид (ПАА), полимер, пилюлька, термический анализ.

INTERPOLIMER KOMPLEKSLARINING TERMOGRAVIMETRIK TAHLILI

Annotsiya

Tatqiqot ishi natriy-karboksimetilsellyuloza (Na-KMS) va chiziqli tuzilishga ega bo'lgan poliakrilamid (PAA) asosida olingan interpolimer komplekslarini termogravimetrik tahlili o'rganilgan. Termogravimetrik tahlilning nazriy asoslari keltirilgan. Polimer moddalarining issiqlikka chidamliligi o'rganilgan. Issiqlik ta'sirida polimer pilyonkasining namlik va massas yo'qotishi chegaralari aniqlangan.

Kalit so'zlar: Termogravimetriya (TGA), natriy-karboksimetilsellyuloza (Na-KMS), poliakrilamid (PAA), polimer, pilionka, termal tahlil.

Kirish. Polimerlarning issiqlikka chidamliligini o'rganishni turli usullari mavjud, jumladan termogravimetrik tahlil (TGA), differentsial termal tahlil (DTA), differentsial skanerlash kalorimetri (DSC) va o'sib boruvchi gaz tahlili (EGA) [1].

Dastlabki TGA tajribalarida namunalarni aniq haroratgacha ma'lum vaqt intervalida qizdirib, namunani massasini o'lchab, chiqib ketgan massani aniqlash orqali amalga oshirilgan [2]. 1915-yilda Honda TG ni dastlabki ishlab chiqishga patent oldi va yanada aniqroq ishlovchi TG ni ishlab chiqardi [4]. Uning jihozlari vazn yo'qotish paytida isitish tezligini boshlang'ich darajadan asta-sekin kamaytirish uchun mo'ljallangan. Bu davrda TG asosan noorganik birikmalarni tahlil qilish uchun ishlatilgan. TGA, ayniqsa, inyeksion qoplama, elektr va elektron tarmoqlar uchun qoplama materiallari, bo'yoqlar, farmatsevtika, oziq-ovqat sanoati, neft, yopishtiruvchi va boshqalar kabi polimer materiallardan foydalanadigan namunalarda juda muhimdir [12].

Mavzuga oid adabiyotlar tahlili. Zamonaviy TGAda boshqariladigan muhitda harorat va vaqtga nisbatan namunalarning massasi o'zgarishining miqdori va chastotasini aniqlaydi [6,8]. TGA birinchi navbatda termal barqarorlikni (ma'lum haroratda materialning mustahkamligi), oksidlanish barqarorligini (materialda kislorodni yutish tezligi), shuningdek kompozitsion xususiyatlarni (masalan, plomba moddalari, polimer qatronlari, erituvchilar) o'rganish uchun ishlatilishi mumkin. Bundan tashqari, namunalarning vazni ortishi, yo'qolishi turli omillarga olib ketadi.

Dinamik mexanik tahlil (DMA), DSC tahlili va harorat bilan modulyatsiyalangan differentsial skanerlash kalorimetri (TMDSC) kabi boshqa termal tahlil turlari TGA tahlilini to'ldirishi mumkin. DMA tahlili harorat yoki chastota funksiyasi sifatida polimer materiallarning viskoelastik harakatlarini o'rganish uchun ishlatiladi. Shu bilan birga, DSC tahlili material qizdirilganda yoki sovutilganda harorat funksiyasi sifatida material tomonidan so'rilgan yoki chiqarilgan energiyani o'lchash uchun ishlatiladi. U endotermik va ekzotermik jarayonlar haqida miqdoriy va sifatiy ma'lumotlarni taqdim etishi mumkin edi. Erish harorati, kristall fazaga o'tish harorati va o'ziga xos issiqlik yoki issiqlik sig'imi kabi xususiyatlar DSC tahlilidan olinishi mumkin [11].

Tatqiqot metodologiyasi. Termogravimetrik tahlil (TGA) - namuna harorati $T(t)$ qonuniyat bilan chiziqli oshirilgan yoki kamaytirilgan paytda, namunaning massasidagi o'zgarishlarni doimiy kuzatib o'rganish. Tahlil davomida isitish tezligi o'zgarmas bo'lib, issiqlik chiziqli o'zgartiriladi. Namunani isitish tezligini β deb belgilansa, uning o'zgarish qonunini quyidagicha ifodalanishi mumkin:

$$\beta = \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

bu yerda dT - haroratning o'zgarishi va dt - vaqtning o'zgarishi [12].

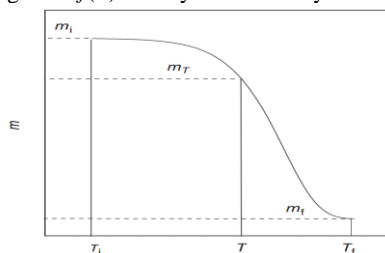
Namuna vaznining o'zgarish mexanizmi va kinetikasini TG egri chizig'ining shakli va holati ko'rsatadi. Termik tahlil qilingan namunadan olinga natijalar quyidagi uchta kattali asosiy o'zgaruvchi, harorat (T), konversiya darajasi (α) va bosim (P) [13,14] ga bog'liq. O'zgarish qonunini quyidagicha yozish mumkin:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T) \cdot f(\alpha) \cdot h(P) \quad (2)$$

Bosim kinetik jarayonlarga katta ta'sir ko'rsatishi mumkin bo'lsa-da, kinetik simulyatsiyalarda $h(P)$ odatda e'tiborga olinmaydi. Bosim kinetikaga ta'sir qilmaydi deb faraz qilsak, jarayon tezligi faqat ikkita o'zgaruvchiga ega bo'lgan funksiyaga aylanadi, T va α :

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T) \cdot f(\alpha) \quad (3)$$

bu yerda $k(T)$ tezlikning haroratga bog'liqligini va $f(\alpha)$ reaksiya modeli bo'yicha konversiyaga bog'liq kattalik.



1-rasm. Konvertatsiya darajasini aniqlash uchun TGA massa yo'qotish qonuniyati funksiyasidan foydalanish

Konversiya darajasi tajribada umumiy massa va fraksilarning qancha qismi yo'qolganini anglatadigan kattalik:

$$\alpha = \frac{m_i - m_T}{m_i - m_f} \quad (4)$$

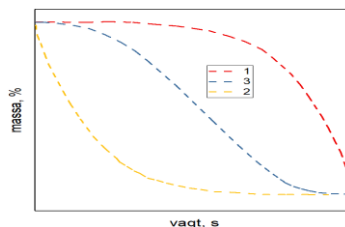
bu yerda m_i va m_f mos ravishda namunaning boshlang'ich va oxirgi massasi, m_T - namunani T haroratdagi massasi. Tajriba davomida α kattalik 0 dan 1 gacha intervada o'zgaradi. Tezlik konstantasining haroratga bog'liqligi odatda Arrhenius tenglamasiga bo'ysunadi [15]:

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (5)$$

bu erda A va E kinetik parametrlar bo'lib, mos ravishda preeksponensial omil va uyg'onish energiyasi. R universal gaz doimiysi, T esa TGA da berilgan termodinamik harorat. (5) tenglamani izotermik TG egri chizig'i sifatida tasvirlash mumkin:

$$g(\alpha) = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) t \quad (6)$$

bu yerda $g(\alpha)$ reaksiya modelining integral shakli. Yuqoridagi (6) tenglamani, (5) tenglamani (3) tenglamaga qo'yib keyin ko'rsatilgandek integrallash orqali olish mumkin. Izotermik sharoitda, odatda, tajriba davomida faqat α o'zgaradi. Reaksiya modellarini uchta asosiy turga bo'lish mumkin: (1) tezlashuvchi, (2) sekinlashuvchi va (3) sigmasimon. Massani yo'qotish egri chizig'i chizilsa, u 2-rasmda keltirilgan grafikka o'xshash bo'ladi.



2-rasm. Tezlashuvchi (1), sekinlashuvchi (2) va sigmasimon (3) reaksiya modellari vazn yo'qotish egri chizig'i.(12)

1. Tezlashtiruvchi modellarni ko'rsatish mumkin, chunki vazn yo'qotish tezligi butun jarayon davomida doimiy ravishda oshib boradi va qonunyatni quyidagicha ko'rsatish mumkin:

$$g(\alpha) = \alpha^n \quad (7)$$

bu yerda n o'zgarimas son.

2. Sekinlashtiruvchi modelga kelsak, u butun jarayon davomida pasayib ketadigan vazn yo'qotish tezligi bilan ifodalangan va modelni quyidagicha ko'rsatish mumkin:

$$g(\alpha) = \frac{1 - (1 - \alpha)^{1-n}}{1-n} \quad (8)$$

bu yerda $n \neq 1$ ($n=1$ bo'lgan hol uchun, $g(\alpha) = -\ln(1 - \alpha)$).

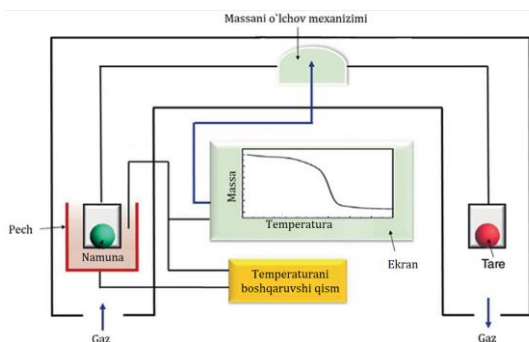
3. Avrami-Erofeev modeli sigmasimon model, bu model konvertatsiya paytida ba'zi bir oraliq qiymatlarda tezlik maksimal nuqtadi. Avrami-Erofeev modeli quyida qonuniyatga bo'ysunadi:

$$g(\alpha) = [-\ln(1 - \alpha)]^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

Yuqoridagi (5) va (1) tenglamani (3) tenglamaga olib borib qo'yib, izotermik bo'lmagan TGA egri chizig'ini tavsiflovchi tenglama hosil qilishimiz mumkin:

$$g(\alpha) = \frac{A}{\beta} \int_0^T A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dT \quad (10)$$

Biroq, termik bo'lmagan holat uchun T va α ning bir vaqtning o'zida o'zgarishi natijasida isitish tezligi doimiy bo'lib qoladi, bu izotermik bo'lmagan TG egri chizig'idan hosil bo'lgan natijani 3-reaksiya modeli bilan bog'lash mumkin emas. Bu holat 3-model reaksiyasi shartiga zid keladi, bunda sigmasimon reaksiya tezlashuvchi fazadan keyin sekinlashtiruvchi fazaga ega.



3-rasm. TG qurilmasining sxematik diagrammasi.

TG asbobi (3-rasm) aniq analitik ma'lumotlarning aniqlab berishini ta'minlash uchun uch xil komponentdan iborat: balans (namuna og'irligini o'lchash uchun), o'choq (chiziqli isitishni ta'minlaydigan), harorat boshqaruvchisi (haroratni o'lchash va nazorat qilish uchun) va qayd qiluvchi (og'irlik va harorat o'zgarishini qayd qilish birligi uchun). Og'irlik o'zgarishi sodir bo'lganda, muvozanat nuri odatdagi holatidan chetga chiqishga moyil bo'ladi. Balansning ikki turidan foydalanish mumkin: nol yoki burilish balansi [10]. Odatda balansning nol turi qo'llaniladi, unda muvozanat nurining nol nuqtasi holatidan og'irishni sezish uchun sensor ishlatiladi [13].

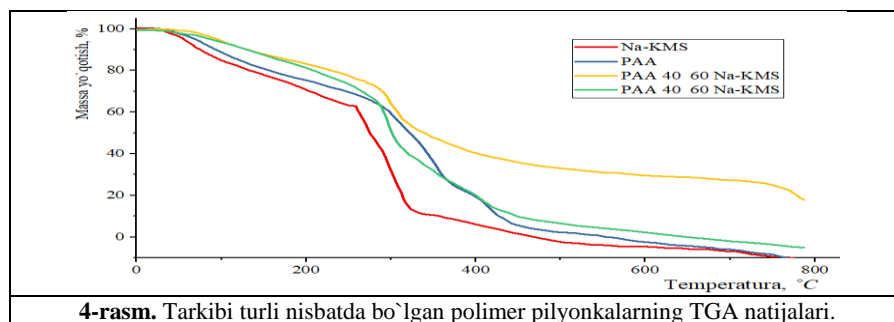
Odatda, TGA qurilmasi 1000°C dan 1600°C gacha bo'lgan harorat oraliqigacha isitish imkoniga ega va isitish tezligi birdan bir necha yuzlab °C/min gacha bo'lishi mumkin. Biroq, odatdagi isitish tezligi 1°C/min dan 20°C/min gacha, juda tez (>20°C/min) yoki juda sekin (<1°C/min) tezliklar faqat ayrim maxsus reaksiyalar uchun ishlatiladi. Zamonaviy TGA bitta haroratli dasturda (masalan, 5°C/min doimiy issiqlik tezligida 30°C dan 900°C gacha) yoki bir nechta harorat dasturlari kombinatsiyasidan (masalan, 100°C da 1 soat davomida izotermik qizdirib, ajralib chiqqan namlikni butunlay olib tashlab, so'ngra namunaning termal xususiyatlarini o'rganish uchun 10°C/min isitish tezligida 100°C dan 900°C gacha qizdirish) ishlashi mumkin [12].

Tekshirilgan namuna qattiq, jel yoki suyuq holatda bo'lishi mumkin, og'irligi 1 mg dan 100 mg gacha, 100 g gacha. TG egri chiziq'lari ma'lumotlari odatda DTG egri chizig'i bilan birlashtirilib, ketma-ket vazn o'zgarishlarini yaxshiroq tushunishga imkonini beradi [12].

Termogravimetrik egri chiziq'lari polimerlarning parchalanish mexanizmini ko'rsatib beradi. Polimer moddasining parchalanish mexanizimi zanjir tarkibi va ketmaketligiga bog'liq. Modda massasini yo'qotish chegarasi issiqlikka chidamliligini ko'rsatadi. Ammo shuni ta'kidlash kerakki, polimerda degradatsiyasi massasi yo'qolishidan oldin boshlanishi mumkin. Polimer degradatsiyasini usullarini a) asosiy zanjir uzilishi, b) yondosh guruhning uzulishi, c) parchalanish, d) qayta polimerlanish, e) struktura o'zgarishi va h) o'zaro bog'lanish bo'lishi mumkin [12].

Tahlil va natijalar. Ma'lum sharoitda, mahalliy ishlab chiqaruvchilar tomonidan ishlab chiqarilgan natriy-karboksimitilsellyloza va poliaktamid polimerlarining suvdagi 2% li eritmasidan foydalanib interpolimer kompleksi olindi. Olingan kompleksdan xona haroratida polimer pilionkasi hosil qilindi.

Polimer pilionkasi termal tahlil termodinamik asboddan – Thermo Scientific TA Instruments STD 650 (AQSh), K tipidagi (Low RG Silver) termojuft va alyuminiy tigelda amalga oshirildi. Barcha o'lchovlar inert azot atmosferasida 50 ml/min tezlikda azotning oqim tezligida amalga oshirildi. Tahlilning harorat oraliq'i 20-1000°C, isitish 5 K/min tezlikda amalga oshirildi. Bir o'lchovdagi namuna miqdori 6-10 mg ni tashkil qiladi. O'lchov tizimi KNO₃, In, Bi, Sn, Zn, CsCl moddalarining standart to'plami yordamida tebranish qilindi. Bir vaqtning o'zida namunaning massasi, komplekslarning parchalanish massasi va termal barqarorlik harorat oshishi bilan o'zgarishi aniqlandi.



Grafikdan shuni ko'rish mumkinki PAA 60:40 Na-KMS namunasi issiqlikka eng chidamli kompleks bo'lib, bu namuna 800°C haroratda ham to'liq uchib ketmagan va o'zining 20% ga yaqin massasini saqlab qolgan. Qolgan namunalar 250°C dan keyin tezda massasini yo'qotib borib 400-500°C oralig'ida to'liq bug'lanib ketgan.

Xulosa va takliflar. Olingan natijalarga etibor bersak tanlab olgan polimer pilyonkalarimizni hususiy issiqlikka chidamliligi o'zaro o'xshash. TGA egri chiziqlari shaklidan buni ko'rishimiz mumkin. Dastlabki bitta yaxlit moddadan o'stirilgan pilyonkalarimizga issiqlik bilan ta'sir qilganimizda 600°C dan so'ng moddalarimiz to'liq bug'lanib ketar ekan. Lekin PAA 40:60 Na-KMS nisbatda olingan namunamiz o'zaro bog'lanish hisobiga issiqlikka chidamliroq bo'lgan.

Dastlabki 300°C gacha bo'lgan oraliqda o'zgarish o'xshash bo'lib, bu haroratgacha interpolimer kompleksimizda destruksiya boradi, katta energiya talab qiluvchi bog'lar uzilib polimerning yondosh guruhlari eng avval parchalanadi va qayta tartiblanib bog'lanadi ekan.

Ko'rinib turibdiki tanlangan polimerlarimiz asosida yangicha hususiyatli, issiqlikka chidamli komplekslarni olishimiz mumkin ekan.

ADABIYOTLAR

1. G. Santhana Krishnan, N. Murali, and A. Jafar Ahamed, *J. Therm. Anal. Calorim.* 129, 821–832 (2017).
2. C. J. Keatch, *Introduction to Thermogravimetry*, Heyden, London, 1969.
3. G. Urbain and C. Boulanger, *Compt. Rend.* 154, 347–349 (1912).
4. K. Honda, *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, 97–103 (1915)
5. C. Duval, *Inorganic Thermogravimetric Analysis*, 2nd ed, Elsevier, Amsterdam, 1963.
6. J. D. Ferry, *Viscoelastic Properties of Polymer* John Wiley & Sons, Inc., New York, 1980.
7. J.W.Dodd and K.H.Tonge, *Thermal Methods: Analytical Chemistry by Open Learning*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK, 1987.
8. M. E. Brown, *Introduction to Thermal Analysis*, Kuwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 1998.
9. E. L. Charsley, *Thermal Analysis—Technique & Applications*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 1992.
10. P. J. Haines, in P. J. Haines, ed., *Thermal Methods of Analysis. Principles, Applications and Problems*, Blackie, Glasgow, UK, 1995, pp. 22–62.
11. Hammer, *Thermal Analysis of Polymers: Selected Applications*, Mettler Toledo, Columbus, Ohio, 2013.
12. S. Vyazovkin, in Elton N. Kaufmann, ed., *Characterization of Materials*, 2nd ed., Vol. 1, pp. 471–483, 2012.
13. M. E. Brown, *Introduction to Thermal Analysis*, 2nd ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 2001.
14. V. B. F. Mathot, *Calorimetry and Thermal Analysis of Polymers*, Hanser Publishers, Munich, West Germany, 1994.
15. T. A. Ozawa, *Bull. Chem. Soc.* 38, 1881–1886, (1965).



UDK: 621.315.592

Shukur GOFUROV,

O'zbekiston-Yaponiya Yoshlar Innovatsiya Markazi, "Energetika" laboratoriyasi kichik ilmiy xodimi

Email: schuckur@gmail.com

Dilbar BOZOROVA,

Ion-plazma va lazer texnologiyalari Instituti doktranti

Mavonbek ZIYAYEV,

Namangan Davat universiteti katta o'qituvchisi

Oksana ISMAILOVA,

O'zbekiston-Yaponiya Yoshlar Innovatsiya Markazi, "Energetika" laboratoriyasi mudiri, f.-m.f.n

f.-m.f.n. A.Mavlyanov taqrizi asosida

BiVO₄ FOTOKATALIZIDA Mo KIRITILISHINIG STRUKTURA VA TA'QIQLANGAN SOHAGA TA'SIRLARINI DFT MODELLASHTIRISH METODI ORQALI O'RGANISH

Annotatsiya

Mo ning BiVO₄ strukturasi kiritilishi rentgen difraksiya spektri va elektron sathlari zichligi nazarayasi (DFT) bilan ko'rsatildi. 2% va 4% Mo ning BiVO₄ strukturasi kiritilishi natijasida monoklinik BiVO₄ ning tetragonal fazaga o'zgarishi tahlil qilindi. Elektron sathlari zichligi natijalariga ko'ra Mo kiritilganda BiVO₄ ning ta'qiqlangan sohasida o'zgarish bo'lmadi. Ammo, elektronlarning o'tkazish sohasida ko'proq yig'ilishi hisobiga BiVO₄ ning fotokatalitik qobiliyatini oshishiga sabab bo'ladigan Fermi sathi siljishi kuzatildi.

Kalit so'zlar: BiVO₄, fotokatalist, vodorod energiyasi.

STRUCTURAL AND BAND GAP EFFECTS IN Mo DOPED BiVO₄ PHOTOCATALYST: DFT CALCULATION

Annotation

Effect of Mo doping into BiVO₄ structure showed by XRD pattern and DOS calculated by Density Functional Theory (DFT). It has been shown that 2% and 4% Mo incorporation into BiVO₄ structure can change monoclinic BiVO₄ to a tetragonal scheelite structure. DOS calculation showed that Mo Doping had not changed the band gap in optimized structures. However, the Fermi level has been shifted to the conduction band which contributes more electrons that can be occupied in the conduction band which results in increased photocatalytic performance of BiVO₄.

Key words: BiVO₄, photocatalyst, hydrogen energy.

ЭФФЕКТЫ СТРУКТУРЫ И ЗАПРЕЩЕННЫЙ ЗОНЫ В ФОТОКАТАЛИЗАТОРЕ BiVO₄, ДОПИРОВАННОГО Mo: ТЕОРИЯ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ

Аннотация

Эффект легирования молибдена (Mo) в структуру BiVO₄ показан с помощью рентгенограммы и плотности состояний (DOS), рассчитанные с помощью теории функционала плотности (DFT). Показано, что введение 2% и 4% Mo в структуру BiVO₄ может изменить моноклинную на тетрагональную структуру BiVO₄ шеелита. Расчет DOS оптимизированных структур показал, что легирование молибденом не изменило ширину запрещенной зоны. Однако, наблюдается смещение уровня Ферми в зону проводимости, влияющее на рост числа электронов, которые могут быть заняты в зоне проводимости, что приводит к увеличению фотокаталитической активности BiVO₄.

Ключевые слова: BiVO₄, фотокатализатор, водородная энергетика.

Kirish. Hozirgi vaqtda, quyosh energiyasidan foydalangan holda, suvni fotokatalizator yordamida vodorod hamda kislorodga ajratishda BiVO₄ (yoki BVO) fotoanodi eng yaxshi nomzod bo'lib turibdi [1-3]. BVO nisbatan tor ta'qiqlangan sohaga egaligi, ko'zga ko'rinuvchi yorug'lik nurini yutishi, yemirilishga bardoshlilik kabi muhim hususiyatlarga egaligi ushbu yarim o'tkazgichli materialga bo'lgan qiziqishni saqlab kelmoqda [4-6]. Ammo ushbu moddaning ham boshqa moddalar kabi kichik kamchiliklari mavjud. Masalan, yorug'lik nuri energiyasi ta'sirida valent sohadagi elektronlarning o'tkazuvchan sohaga o'tishi jarayonida go'vaklar bilan qayta birlashishining yuqori ko'rsatgichi BVO ning samaradorligiga salbiy ta'sir ko'rsatadi [7-10]. Buni oldini olish uchun, BVO ni strukturaviy jihatdan mustahkamlash talab etiladi: ta'qiqlangan sohaning qisqartirish yoki sirt sathida elektronlari ko'proq bo'lgan elementni qo'shish orqali valent sohadan o'tkazuvchan sohaga ko'proq elektronlar o'tishini ta'minlash mumkin. Malasan, BVO tarkibidagi uch kimyoviy elementdan birining qisman almashtirish, elektronlarning o'tish sohasiga yetib borishiga hamda fotokatalitik qobiliyatini oshishiga sabab bo'lishi mumkin. Misol uchun, ushbu modda tarkibidagi kislorodning qisman oltungugurt bilan almashtirish, oltungugurtning sirt elektron sathining yuqoriligi hamda ionik radiusining kattaligi hisobiga BVO ning ta'qiqlangan sohasini torayishiga, natijada esa elektronlarni o'tish sohasiga ko'proq yetib borishiga olib kelishi mumkin [11-13]. Bundan tashqari, Bi yoki V ning boshqa elementlar, masalan, Zr, W, Hf, Mo kabi elementlarga qisman almashtirish ham, elektronlar sonining modda

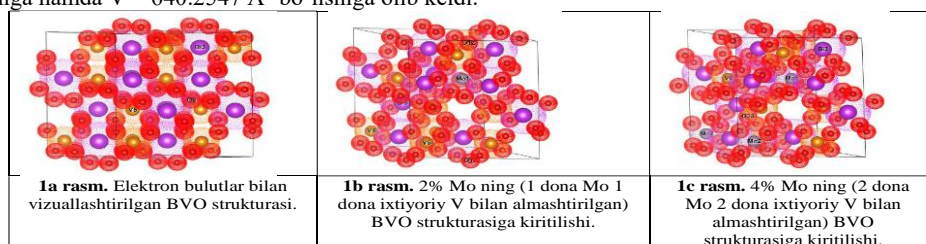
tarkibida ko'proq bo'lishiga, oqibatda, elektron o'tishlar sonining ortishi hamda bu orqali elektron-g'ovaklar qayta birlashishi miqdorini kamayishiga olib kelishi mumkin. Bunday usulda yarim o'tkazgichli fotokatalizatorlarning samaradorligini oshirish samarador usul hisoblanadi.

Ushbu ishda, BVO moddasiga Mo ning qisman kiritilishi elektron sathlari zichligi nazarayasi (DFT) metodi yordamida hisoblandi. Ishning maqsadi bu kabi hisoblashlar orqali tajribada sodir bo'ladigan BVO ning strukturaviy o'zgarishi hamda ta'qiqlangan sohadagi fizik hodisalarni tushunishdan iborat.

Tadqiqot metodi. Monoklinik BVO ning 24 atomdan iborat standart strukturasi tadqiqot ob'ekti sifatida tanlandi. Tajriba mobaynida ushbu struktura 2 barobarga oshirilib, umumiy hisobda 48 atomdan (8 Bi, 8 V, 32 O) iborat struktura hosil qilindi. Ushbu struktura Quantum Espresso 6.7 hisoblash paketi yordamida optimallashtirildi. Keyingi o'rinlarda bitta, hamda ikkita Mo elementi ixtiyoriy V lar o'rniga joylashtirildi, hamda struktura optimallashtirildi. Natijada, BVO strukturasi 2% hamda 4% li Mo elementi kiritilishi ta'minlandi.

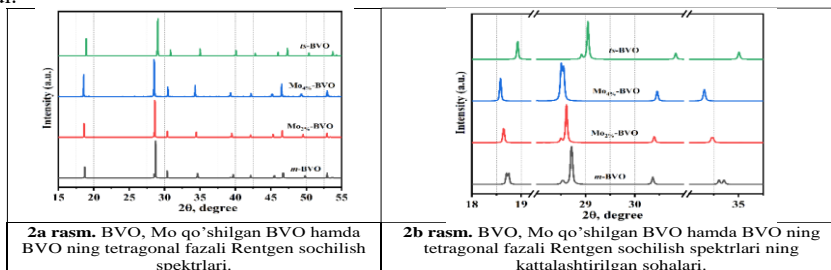
Strukturani optimallashtirishda to'lqin funksiyasi uchun 45 Ry kintek energiya va zaryad zichligi 455 Ry o'rnatildi. Hisoblash jarayonida $4 \times 4 \times 4$ k kenglik, gaussian joylashuv, ultrasoft pseudopotensial, va Perdew–Burke–Ernzerhof (PBE) funksiyalari qo'llanaldi. BVO panjarasining parametrlari quyidagicha: $a = 7.330 \text{ \AA}$, $b = 11.811 \text{ \AA}$, $c = 5.149 \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, and $\gamma = 134.227^\circ$. Optimallashtirilgan strukturalar VESTA dasturi yordamida vizuallashtirildi hamda tahlil qilindi.

Natijalar va ularning muhokamasi. 1a rasmda BVO ning eng kichik birlik strukturasi (24 atomdan iborat) ikki karra oshirilgan strukturasi optimallashtirishdan keyingi joylashuvi keltirilgan. BVO $V = 629.6460 \text{ \AA}^3$ hajmga ega bo'lgan bo'lsa, 2% Mo qo'shilgandan keyin uning hajmi $V = 635.6728 \text{ \AA}^3$ ni ko'rsatdi. 4% Mo kiritilishi esa, toza BVO hajmini yanada oshishiga hamda $V = 640.2547 \text{ \AA}^3$ bo'lishiga olib keldi.



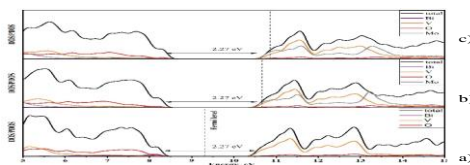
Demak, Mo ning V bilan almashishi BVO strukturasi hajmiy kengayishiga olib keladi, bu esa tajriba mobaynida material morfologiyasining o'zgarishi yoki kristal struktura hajmini o'zgarishiga sabab bo'lishi mumkin. Kristal strukturaning hajmi, misol uchun, yuzada nisbatan kichik kristallarning bo'lishi, materialning kimyoviy reaksiyaga ko'proq kirishishiga olib keladi.

Keyingi navbatda hosil bo'lgan strukturalarning rentgen difraksiya spektrlari tadqiq qilindi. 2a rasmda toza monoklinik BVO (m-BVO), 2% va 4% li Mo qo'shilgan BVO (Mo_{2%}-BVO va Mo_{4%}-BVO) lar keltirilgan. Ushbu strukturalar BVO ning tetragonal shakli (ts-BVO) bilan ham solishtirilgan. Natijalar shuni ko'rsatadiki, Mo BVO strukturasi 2% kiritilgandayoq monoklinik fazasidan tetragonal fazaga o'zgargani ko'rinadi (2b rasm). 18.7 hamda 34.6 2 lik daraja sohasidagi monoklinik fazaga tegishli qo'sh piklarni Mo qo'shilgandan keyin birlashib ketishi tetragonal fazaga o'tishini tasdiqlaydi.



Eksperimental ishlarda ham Mo ning turli foizlarda BVO ga kiritilganda tetragonal fazaga o'tishi aniqlangan (masalan, M. Rohloff va boshqalar, [14] 15% Mo, BVO ning tetragonal fazaga o'tishiga sabab bo'lishini ko'rsatishgan; G. Talasila va boshqalar [15] ishida esa 3% Mo BVO ning monoklinikdan tetragonal fazaga o'tishini ko'rsatgan). Albatta, eksperimental ishlar va DFT hisoblashlarda farq bo'lishi ham mumkin, chunki kompyuterli modellash vaqtida harorat hamda bosim hisobga olinmaydi. Sistema faqat elektronlarning ehtimoliy joylashuvini hisoblash orqali strukturani hosil qiladi.

Mo ning BVO strukturasi kiritilishi eng avvalo ushbu moddaning tashkil qiluvchi elementlarining yadrolari atrofida joylashgan elektronlarning xolati hamda ular asosida hosil bo'luvchi ta'qiqlangan zonaga ta'sirini o'rganish bilan ham ahamiyatli. Quantum Espresso paketi DFT ga asoslangan holda, elektronlar ehtimoliy joylashuvining hisoblash imkonini beradi. Bunda, Shredenger tenglamasi asosan, Mo kiritilgan BVO strukturasi tashkil qiluvchi elektronlari xolati baholanadi.



3-rasm. BVO (a), 2% Mo (b) va 4% Mo (c) kiritilgan BVO ning elektron zichlik sathlari strukturasi.

3-rasmda BVO va Mo kiritilgan BVO larning elektron zichligi sathlari keltirilgan. BVO da ta'qiqlangan soha 2.27 eV ni ko'rsatsa (3a rasm), Mo qo'shilganda ham ushbu oraliq kengligi o'zgarmay qolmoqda. Ammo, Fermi sathi o'tkazuvchan sohaga qarab siljidi (3b va 3c rasmlar). Bu Mo ning BVO ga kiritilishi elektronlarning eng ko'p joylashgan o'rni o'tkazuvchan sohaga yaqinligi (ushbu ishda Fermi satgi o'tkazuvchan sohada, ammo tajribada bu sath ta'qiqlangan sohada, o'tkazuvchan sohaga yaqin bo'lishi kutiladi). Shu sababli, quyosh nuri energiyasini olgan elektronlar suvni parchalashda ishtirok etadigan elektronlarning soni ortishi hisobiga kimyoviy reaksiyalar sonini oshiradi. Natijada, BVO ning suvni kislorod va vodorodga ajratishdagi fotoanod sifatidagi qobiliyati ham ortadi.

Xulosa. Quantum Espresso DFT paketi yordamida Mo 2% va 4% atom ulushlarida BiVO₄ strukturasi V ni almashirish hisobiga kiritildi va optimallashtirildi. Uning Rentgen sochilish spektri Mo ning BiVO₄ strukturasi monoklinik fazasidan tetragonal fazaga o'tishi mumkinligini tadqiq etildi. Mo ning V ga nisbatan ortiqcha elektronlarning mavjudligi BiVO₄ o'tish sohasida ortiqcha elektronlarni hosil qiladi hamda fotokatalitik qobiliyatini oshishiga xizmat qilishi mumkin.

ADABIYOTLAR

- H. S. Han, S. Shin, D. H. Kim, I. J. Park, J. S. Kim, P.-S. Huang, J.-K. Lee, I. S. Cho, X. Zheng, *Energy Environ. Sci.*, 11, 1299 (2018).
- J. H. Kim, J.-W. Jang, Y. H. Jo, F. F. Abdi, Y. H. Lee, R. van de Krol, J. S. Lee, *Nat. Commun.*, 7, 13380 (2016).
- Kudo, K. Ueda, H. Kato, I. Mikami, *Catal. Lett.*, 53, 229 (1998).
- Pihosh Y., Turkevych I., Mawatari K., Uemura J., Kazoe Y., Kosar S., Makita K., Sugaya T., Matsui T., Fujita D., Tosa M., Kondo M., Kitamori T., *Sci. Rep.*, 5, 11141 (2015).
- Iwase, S. Nozawa, Adachi S., Kudo A., *Photochem J. Photobiol.*, A, 353, 284-291 (2018).
- Pan Z., Röhr J. A., Ye Z., Fishman Z. S., Zhu Q., Shen X., Hu S., *Sustainable Energy Fuels*, 3, 850-864 (2019).
- Lee D. K., Lee D., Lumley M. A., Choi K.-S., *Chem. Soc. Rev.*, 48, 2126-2157 (2019).
- Pattengale B., Ludwig J., Huang J., *Phys J. Chem. C*, 120, 1421-1427 (2016).
- Zhao Z., Dai H., Deng J., Liu Y., Tong Ch., *Chinese Journal of Catalysis*, 34 1617-1626 (2013).
- Shang M., Wang W., Ren J., Sun S., Zhang L., *Cryst. Eng. Comm.*, 12, 1754-1758 (2010).
- Lamers M., Li W., Favaro M., Starr D. E., Friedrich D., Lardhi Sh., Cavallo L., Harb M., Krol R., H L. Wong, Abdi F., *Chem. Mater.*, 30, 8630 (2018).
- Guo M., Wang Y., He Q., Wang W., Wang H., Fu and Z. Wang H., *RSC Adv.*, 5, 58633 (2015).
- Nguyen V. H., Bui Q. T. P., Vo D.-V. N., Lim K. T., Bach L. G., Do S. T., Nguyen T. V., Doan V.-D., Nguyen T.-D., *Materials*, 12, 2681 (2019).
- Rohloff M., Scheu Ch., Anke B., Zhang S., Gernert U., Lercha M., Fischer A., *Sustainable Energy Fuels*, 1, 1830 (2017).
- Talasila G., Sachdev S., Srivastva U., Saxena D., Ramakumar S.S.V., *Energy Reports* 6, 1963-1972 (2020).



UDK: 544.526.5

Erkin ZAXIDOV,

*O'z RFA U.Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti
Kondensirlangan muhitlar optikasi laboratoriyasi professori, f-m.f.d., (DSc),
E-mail: ezakhidov@hotmail.com*

Aziz SAPARBAYEV,

*O'z RFA U.Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti.
Kondensirlangan muhitlar optikasi laboratoriyasi, katta ilmiy xodimi
ф.-м.ф. (Ph.D.),
E-mail: saparbaevaziz83@gmail.com*

Farid RO'ZIYEV,

*O'z RFA U.Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti.
Kondensirlangan muhitlar optikasi laboratoriyasi kichik ilmiy xodimi
E-mail: roziyevf@list.ru*

Abror TURGUNBOEV,

*O'z RFA U.Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti.
Kondensirlangan muhitlar optikasi laboratoriyasi kichik ilmiy xodimi
E-mail: turgunovabror9606@gmail.com*

Sanobar REYMBAYEVA,

*O'zbekiston Milliy Universiteti o'qituvchisi
E-mail: reymbaeva71@mail.ru*

Sevara ABDULLAYEVA,

*O'zbekiston Milliy Universiteti magistranti
E-mail: sevarakhonabdullayeva@gmail.com*

O'z MU Fizika fakulteti dekani, m.-f.f.n. (Ph.D.), dotsent, G'.Eshonqulov taqrizi asosida

PBB-TSD:IT-4F ASOSIDAGI ORGANIK QUYOSH ELEMENTLARINING PARAMETRLARINI TADQIQ QILISH

Annotatsiya

Maqolada TSD:IT-4F asosidagi organik quyosh elementlarining optik va fotoelektrik parametrlari tahlil qilindi. PBB-TSD va IT-4F polimerlarining yutilish spektrlari, shuningdek, ularning aralashmalari va 1,8-Diodooktan (DIO) qo'shimcha qo'shish orqali strukturasi yaxshilangan TSD:IT-4F faol qatlam xossalari o'rganildi va solishtirildi. TSD:IT-4F aralashmalarni tayyorlashda donor va akseptor materiallar turli xil nisbatda olinib, bu aralashmalarning optik va fotovoltaiik parametrlari o'rganildi.

Kalit so'zlar: PBB-TSD:IT-4F; organik quyosh elementi; DIO, fotovoltaiik parametrlar.

STUDY OF THE PARAMETERS OF ORGANIC SOLAR CELLS BASED ON PBB-TSD:IT-4F

Abstract

In this work, analyzed the optical and photoelectric parameters of organic solar cells based on TSD:IT-4F. The absorption spectra of pure polymers PBB-TSD and IT-4F, as well as their mixtures and modifications using 1,8-Diodooctane (DIO), have been studied and compared. The dependence of the influence of the qualitative composition of such mixtures on the efficiency and the active layer is established, and the corresponding optimal composition is determined.

Keywords: PBB-TSD:IT-4F; organic solar cell; 1,8-diooctan; photovoltaic parameters.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ PBB-TSD:IT-4F

Аннотация

В работе проанализированы оптические и фотоэлектрические параметры органических солнечных элементов на основе TSD:IT-4F. Изучено и проведено сравнение спектров поглощения чистых полимеров PBB-TSD и IT-4F, а также их смесей и модификаций при помощи 1,8-Диодооктан (DIO). Установлена зависимость влияния качественного состава таких смесей на КПД и активный слой, и определен соответствующий оптимальный состав.

Ключевые слова: TSD:IT-4F; органический солнечный элемент; DIO; фотоэлектрические параметры.

Kirish. Bugungi kunga kelib organik quyosh element (OQE) lari sohasida bir qancha samarali natijalarga erishildi. OQE arzon ishlab chiqarish texnologiyasi bilan boshqa turdagi quyosh elementlaridan ajralib turadi. Ekologik toza, egiluvchan, keng maydonlarni ishlab chiqarishda qulaylik va ancha tejamkor bo'lish xususiyatlari tufayli OQE istiqbolli energiya manbalari hisoblanadi [1]. OQE larining taqdim etilayotgan texnologiyasi istiqbolli texnologiya bo'lib, u orqali tejamkor energiya ishlab chiqarishga erishish mumkin. Tijoratlashtirish uchun talab qilinadigan yuqori energiya o'zgartirish

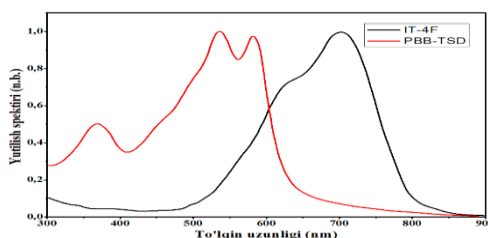
samaradorligi (EO'S) hozirda bitta faol qatlam strukturaga ega, faol qatlam tarkibida uchta yoki undan ko'p polimer mavjud bo'lgan va tandem (ko'p qavatli faol qatlam ega) asosli OQElarning EO'S ko'rsatkichi 18% dan ortadi, bu esa o'z o'rnida ijobiy ko'rsatkich hisoblanadi [2]. Yangi konjugatsiyalangan polimer asosli OQElarni yasash nuqtai nazaridan eng muvaffaqiyatli strategiya donor-akseptor (D-A) aralashmasini qo'llashdir. D-A aralashmali konjugatsiyalangan polimerlar katta afzalliklarga ega bo'lib, masalan:

- quyosh fotonlarini ko'proq yig'ish uchun yuqori yutilish koeffitsienti bilan birga keng yutilish spektriga ega;
- optimal va osongina sozlanishi mumkin bo'lgan molekulyar energetik sathga egaligi, natijada akseptorlar (yoki donorlar)ga mos keladigan ko'proq donor yoki akseptor polimerlarni olishni ta'minlaydi;
- zaryadni ajratish va tashishni osonlashtiradigan yaxshilangan zaryad harakatchanligiga ega [3].

Hajmiy geterostruktura tuzilishiga ega bo'lgan OQElarning D-A materiallarini to'g'ri tanlash hamda ularning optik parametrlari muhim ahamiyat kasb etadi. Ushbu ishda hajmiy geterostrukturali PBB-TSD:IT-4F asosidagi OQElarning optik va fotovoltaiq parametrlarini tahlil qilindi. Buning uchun dastlab PBB-TSD:IT-4F asosidagi OQE yasab olindi [4].

OQElarni yasash quyidagi ITO/PEDOT:PSS/PBB-TSD:IT-4F/PFN/Al struktura orqali amalga oshirildi, buning uchun eng avvalo qatlam qارشiligi 15 Om/sm² bo'lgan ITO (indi y qalay oksidi) qoplangan shisha tagliklar ultratovush vannada ultra toza suv, atseton va izopropil spirti bilan tozalanadi, keyin 6 daqiqa kislorod plazmasi bilan ishlov berilgach, PEDOT:PSS (poli(3,4-etilendioksitiofen) polistiroil sulfonat) "spin coating" usulida (4000 ayl/daq., 20 sek.) ITO ustiga yotqiziladi. Keyin PEDOT:PSS tarkibidagi suv molekularini bug'latish uchun 20 daqiqa davomida 160 °C haroratli pechkada quritildi. PBB-TSD va IT-4F 10 mg/ml polimer donor konsentratsiyasi bilan bog'liq proporsiyada xlorobenzolda eritildi [5]. Eritma bir necha soat davomida xona haroratida aralashtirildi va PBB-TSD:IT-4F aralashmasi PEDOT:PSS qatlam ustiga "spin coating" usuli bilan qoplanadi. Faol qatlamning qalinligi ~110 nm bo'ladi. Keyin PFN poly[(9,9-bis(3'-(N,N-dimethylamion)propyl)-2,7-fluorene)-alt-2,7-(9,9-dioctyl)-fluorene]ning metanol eritmasidan (2,0 mg/ml) yupqa qatlami 30 soniya davomida 2000 ayl/daq tezlikda faol qatlam ustiga "spin coating" usulida qoplanadi. So'ngra, qalinligi 100 nm bo'lgan Al qatlami katod sifatida termik bug'lantirish usulida faol qatlamga 4·10⁻⁴ Pa bosim ostida bug'lantirilib katod yotqiziladi [6].

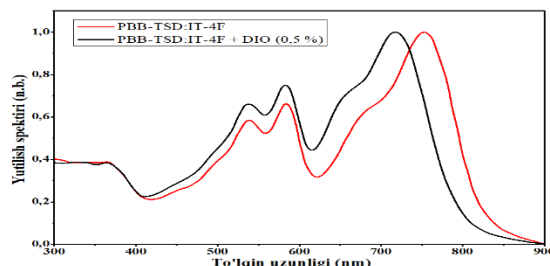
Yuqorida aytib o'tilganidek OQElarning konjugatsiyalangan D-A materiallarni to'g'ri tanlash muhim hisoblanadi. Xususan fulleren tarkibiga ega bo'lmagan akseptorlar energiya darajalarining oson o'zgartirilishi, kuchli optik assimilyatsiya va yaxshi barqarorlik kabi ta'sirchan xususiyatlariga ega ekanligi fulleren tarkibli hosilalari bilan solishtirganda yuqori samaradorlikni namoyish etadi [7]. Bu fullereniz turli xil samarali past diapazonli donor-akseptor birikmalarini hosil qilinishiga hamda energiya o'zgartirish samaradorligi (EO'S) yaxshilanishiga olib keldi. Shu nuqtai nazardan, yorug'likni maksimal darajada yig'ish uchun D-A sifatida keng tarmoqli bo'shliqlari bo'lgan qo'shimcha konjugatsiyalangan (tarmoqlangan) polimerlar tanlanishi kerak [8]. Shuning uchun ham ushbu ishda fulleren tarkibiga ega bo'lmagan D-A polimer materiallari tanlandi. Dastlab PBB-TSD va IT-4F D-A materiallarini ITO/PEDOT:PSS ustiga alohida yotqizilib ularning yutilish spektrlari 300nm-900nm to'liq uzunligi kengligida olindi. 1-rasmda PBB-TSD va IT-4F qatlamlarining yutilish spektrlari ko'rsatilgan.



1-rasm. PBB-TSD va IT-4F qatlamlarining yutilish spektri.

Olingan natijalarga e'tibor beradigan bo'lsak PBB-TSD qatlami yutilish spektri (qizil chiziq) 375nm, 530nm, 680nm to'liq uzunliklarida maksimum piklar hosil bo'ldi. Demak PBB-TSD qatlami mana shu maksimum piklarni hosil qiluvchi to'liq uzunliklarda yorug'likni yaxshi yutadi. IT-4F qatlami yutilish spektri maksimum piklari 625 nm 700 nm to'liq uzunligiga mos keladi. Rasmdan ko'rinib turibdiki, PBB-TSD qatlamining yutilish spektri IT-4F qatlami yutilish spektriga nisbatan qisqa to'liq uzunligida hosil bo'ldi. Olingan natijalardan ko'rish mumkinki, ko'zga ko'rinuvchi to'liq uzunligi sohasi (400nm ÷ 800 nm) da IT-4F qatlami yutilish spektri 500 nm va 800 nm to'liq uzunligi orasida ancha yaxshi ekan. PBB-TSD uchun 368 nm da joylashgan intensiv yutilish cho'qqisi konjugatsiyalangan magistrallning $\pi-\pi^*$ o'tishlari uchun xarakterlidir. PBB-TSD uchun 538 va 578 nm da joylashgan bimodal assimilyatsiya cho'qqilari donor va akseptor o'rtasida kuchli molekulyar zaryad o'tkazuvchanligi bilan bog'liq bo'lishi mumkin. Olingan yutilish spektrlaridan shuni aytishimiz mumkinki PBB-TSD va IT-4F qatlamlarining yutilish spektrlari OQElari uchun optimal natija ekanligi ma'lum bo'ldi [9].

Shundan so'ng PBB-TSD va IT-4F polimer materiallari D-A konsentratsiyasi bilan bog'liq turli-xil nisbatlarda xlorobenzolda eritildi va ITO/PEDOT:PSS ustiga faol qatlam sifatida qoplandi. Bundan tashqari PBB-TSD va IT-4F D-A materiallariga yaxshi aralashishi maqsadida qo'shimcha erituvchi 1,8-diodoktan (DIO) moddasi hajm bo'yicha 0.5 % kichik konsentratsiyada kiritilib faol qatlam hosil qilindi. 2-rasmda DIO qo'shmasdan hamda DIO qo'shimcha sifatida kiritilgan faol qatlamlarning yutilish spektrlari ko'rsatilgan.



2-rasm. PBB-TSD:IT-4F va PBB-TSD:IT-4F+DIO faol qatlamlarining yutilish spektri.

2-rasmda shuni ko'rishimiz mumkinki, PBB-TSD:IT-4F ning yutilish spektri qizil chiziq bilan ko'rsatilgan DIO kiritilgan PBB-TSD:IT-4F ning yutilishi qizil chiziq bilan ko'rsatilgan. Olingan bu ikkala yutilish spektri OQElari uchun optimal natija bo'ldi [10]. Bu ikkala olingan natijadan shuni ko'rishimiz mumkinki DIO ni qo'shimcha sifatida kiritganimizda PBB-TSD:IT-4F maksimum piklari qisqa to'lqin uzunligi tomon siljiganini ko'rishimiz mumkin. Bunda maksimum piklar qisqa to'lqin uzunligi tomon 35 nmga siljidi. Ya'ni DIOsiz PBB-TSD:IT-4F faol qatlamining optimal yutilish spektri 750 nm to'lqin uzunligida DIO kiritilgan PBB-TSD:IT-4F maksimal yutilish spektri esa 715 nm to'lqin uzunligida hosil bo'lishini ko'rishimiz mumkin. Yutilish spektrining bunday qisqa to'lqin uzunligi tomon siljishi spektroskopiyada - "Gipsoxrom" deb ataladi. Gipsoxrom deb - yutilish spektrining yuqori energiyaga yoki qisqaroq to'lqin uzunligiga siljishi aytiladi. Bu albatta konjugatsiyalangan polimer materiallarining $\pi-\pi^*$ o'tishlari hamda bog'lanish darajalari bilan bog'liq. OQElari sohasidagi maqolalarda DIO ni faol qatlamga qo'shimcha sifatida kiritish alohida kristallitliklarning o'rtacha hajmiga ta'sir qilmaydi, balki ularning sonini oshiradi [11]. Bundan tashqari, DIO o'ziga xos o'lchamini saqlab, amorf domenlarda D-A larni o'zaro aralashishini yaxshilaydi. DIO qo'shimchasini kerakli miqdorda faol qatlam eritmasi tarkibiga qo'shish orqali uning sirt morfologiyasini tartiblanishiga va buning natijasida eksitonlar dissotsiatsiya oshishiga olib keladi. Demak DIO ni qo'shimcha sifatida kiritish PBB-TSD:IT-4F faol qatlamining yutilish spektrini yaxshilanishiga erishildi. OQE lari uchun mos D-A materiallarini tanlash, ularni massa ulushi, faol qatlamining yaxshi yutilish koeffitsienti hamda fotovoltaiq parametrlari muhim hisoblanadi. Demak bu ikkala IT-4F:PBB-TSD donor-akseptor yarimo'tkazgich polimer materiallari o'zaro birikib bir birini to'ldirib bir-biri bilan yaxshi D-A struktura hosil qilgan deya xulosa qilishimiz mumkin [12].

OQElarning faol qatlami yutilish spektri optik xossalari bo'yicha olgan xulosalarimizni tekshirish uchun uning fotovoltaiq parametrlari turli sharoit (D-A materiallarni turli konsentratsiyada) larda o'lchandi. 1-jadvalda PBB-TSD:IT-4F asosidagi OQElarni turli sharoitlarda tayyorlab, ularning ochiq zanjir kuchlanishi (V_{oc}), qisqa tutashuv tok oqim zichligi (J_{sc}), to'ldiruvchi faktor (FF), energiya o'zgartirish samaradorligi EO'S kabi fotovoltaiq parametrlari ko'rsatilgan.

1-jadval. Turli ishlov berish sharoitlarida olingan PBB-TSD:IT-4F asosidagi OQElarning fotovoltaiq parametrlari.

PBB-TSD:IT-4F (massa bo'yicha)	Qo'shimcha	V_{oc} [V]	J_{sc} [mA cm^{-2}]	FF [%]	EO'S [%]
1:1	-	0.91	20.0	69.2	12.6
1:1.2	-	0.93	20.6	70.7	13.6
1:1.4	---	0.92	19.4	68.4	12.8
1:1.5	---	0.91	20.0	69.2	12.6
1:1.2 ^a	0.5% DIO	0.89	21.9	74.5	14.6

1- jadvalda PBB-TSD:IT-4F asosli OQE larning D-A materiallari eritmasini massa ulushi bo'yicha turli nisbat (1:1, 1:1.2 va 1:1.4 1:1.5 1:1.2^a)da olib, hamda DIO ni qo'shimcha sifatida kiritib "spin coating" usuli bilan hosil qilingan OQE larining fotovoltaiq parametrlari ko'rsatilgan. Jadvaldan ko'rinib turibdiki, PBB-TSD:IT-4F asosidagi OQElarning D-A materiallari uchun optimal bo'lgan massa ulushi nisbati 1:1.2 ekan. Bunda ochiq zanjir kuchlanishi 0.93 V, qisqa tutashuv tok zichligi 20.6 mA cm^{-2} , to'ldirish faktori 70.7% va EO'S esa 13.6 % tashkil qildi. Faol qatlam D-A tarkibi uchun optimal bo'lgan 1:1.2 nisbatni olib unga qo'shimcha sifatida 0.5 % hajmda DIO moddasini kiritildi. Natijada PBB-TSD:IT-4F asosidagi OQElarning fotovoltaiq parametrlari yanada yaxshilanishiga erishildi. Jadvaldan ko'rishimiz mumkinki, DIO qo'shimcha kiritilganda ochiq zanjir kuchlanishi 0.89 V, qisqa tutashuv tok zichligi 21.9 mA cm^{-2} , to'ldirish faktori 74.5 % va EO'S esa 14.6 % tashkil qildi. Demak PBB-TSD:IT-4F asosidagi OQE ga DIO moddasini 0.5 % hajmda qo'shimcha sifatida kiritganimizda uning EO'S 13.6 % dan 14.6 % o'sishini jadvaldan ko'rishimiz mumkin [13].

Xulosa. Fullerenisiz PBB-TSD:IT-4F polimer asosli OQElarini fotovoltaiq parametrlari faol qatlam tarkibidagi D-A materiallarni alohida yutilish spektrlarining parametrlariga, hamda ularning hajmiy geterostruktura usulida olingan faol qatlami yutilish spektriga bog'liq ekan. DIO moddasini hajm bo'yicha 0.5 % konsentratsiyada qo'shimcha sifatida kiritish orqali PBB-TSD:IT-4F OQE larning optik hamda fotovoltaiq parametrlarini yaxshilanishiga erishish mumkin ekan. PBB-TSD:IT-4F polimer asosli OQElari faol qatlam tarkibidagi D-A materiallarni massa ulushi bo'yicha 1:1.2 nisbatda olinganda optimal fotovoltaiq parametrlarga erishildi. Bu natijadan xulosa shuki, OQElarning optik va fotovoltaiq parametrlari D-A materiallari massa ulushiga ham bog'liq ekan. DIO ga o'xshash qo'shimcha eruvchilarning D-A eritmasida ishtiroki donor va akseptorlarning tartibli bog'lanishi, zaryadlarning harakatchanligini va D-A faol qatlamlarning morfologiyasini yaxshilashda alohida ahamiyatga ega ekan.

ADABIYOTLAR

- Liu, X.; Ma, R.; Wang, Y.; Du, S.; Tong, J.; Shi, X.; Li, J.; Bao, X.; Xia, Y.; Liu, T.; Yan, H. Significantly Boosting Efficiency of Polymer Solar Cells by Employing A Nontoxic Halogen-Free Additive. ACS Appl. Mater. Interfaces 2021, 13, 11117–11124.

2. Han, J.; Wang, X.; Huang, D.; Yang, C.; Yang, R.; Bao, X. Employing Asymmetrical Thieno[3, 4-d]pyridazin-1(2H)-one Block Enables Efficient Ternary Polymer Solar Cells with Improved Light-Harvesting and Morphological Properties. *Macromolecules* 2020, 53, 6619–6629.
3. Xu, Y.; Cui, Y.; Yao, H.; Zhang, T.; Zhang, J.; Ma, L.; Wang, J.; Wei, Z.; Hou, J. A New Conjugated Polymer that Enables the Integration of Photovoltaic and Light-Emitting Functions in One Device. *Adv. Mater.* 2021, 33, 2101090.
4. Fan, B.; Li, M.; Zhang, D.; Zhong, W.; Ying, L.; Zeng, Z.; An, K.; Huang, Z.; Shi, L.; Bazan, G. C.; Huang, F.; Cao, Y. Tailoring Regioisomeric Structures of pi-Conjugated Polymers Containing Monofluorinated pi-Bridges for Highly Efficient Polymer Solar Cells. *ACS Energy Lett.* 2020, 5, 2087–2094.
5. Wang, J.; Yu, H.; Hou, C.; Zhang, J. Solution-processable PEDOT: PSS: In2Se3 with Enhanced Conductivity as a Hole Transport Layer for High-Performance Polymer Solar Cells. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2020, 12, 26543–26554.
6. Hu, L.; Song, J.; Yin, X.; Su, Z.; Li, Z. Research Progress on Polymer Solar Cells Based on PEDOT:PSS Electrodes. *Polym. Rev.* 2020, 12, 145.
7. Li, W.; Liu, Q.; Jin, K.; Cheng, M.; Hao, F.; Wu, W.-Q.; Liu, S.; Xiao, Z.; Yang, S.; Shi, S.; Ding, L. Fused-Ring Phenazine Building Blocks for Efficient Copolymer Donors. *Mater. Chem. Front.* 2020, 4, 1454–1458.
8. Chen, C.; Zhang, C.; Peng, Y.; Wang, N.; Liu, X.; Du, S.; Tong, J.; Li, J.; Xia, Y. An Alcohol-Soluble Small Molecule as Efficient Cathode Interfacial Layer Materials for Polymer Solar Cells. *Opt. Mater.* 2021, 113, 110909.
9. Liu, G.; Jia, T.; Zhang, K.; Jia, J.; Yin, Q.; Zhong, W.; Jia, X. e.; Zheng, N.; Ying, L.; Huang, F.; Cao, Y. Chlorinated Fused Nonacyclic Non-Fullerene Acceptor Enables Efficient Large-Area Polymer Solar Cells with High Scalability. *Chem. Mater.* 2020, 32, 1022–1030.
10. Sun, C.; Pan, F.; Chen, S.; Wang, R.; Sun, R.; Shang, Z.; Qiu, B.; Min, J.; Lv, M.; Meng, L.; Zhang, C.; Xiao, M.; Yang, C.; Li, Y. Achieving Fast Charge Separation and Low Nonradiative Recombination Loss by Rational Fluorination for High-Efficiency Polymer Solar Cells. *Adv. Mater.* 2019, 31, 1905480.
11. Xia, D.; Wu, Y.; Wang, Q.; Zhang, A.; Li, C.; Lin, Y.; Colberts, F. J. M.; van Franeker, J. J.; Janssen, R. A. J.; Zhan, X.; Hu, W.; Tang, Z.; Ma, W.; Li, W. Effect of Alkyl Side Chains of Conjugated Polymer Donors on the Device Performance of Non-Fullerene Solar Cells. *Macromolecules* 2016, 49, 6445–6454.
12. Wen, S.; Li, Y.; Rath, T.; Li, Y.; Wu, Y.; Bao, X.; Han, L.; Ehmman, H.; Trimmel, G.; Zhang, Y.; Yang, R. A Benzobis(thiazole)-Based Copolymer for Highly Efficient Non-Fullerene Polymer Solar Cells. *Chem. Mater.* 2019, 31, 919–926.
13. Wen, S.; Li, Y.; Zheng, N.; Raji, I. O.; Yang, C.; Bao, X. High-Efficiency Organic Solar Cells Enabled by Halogenation of Polymers Based on 2D Conjugated Benzobis(thiazole). *J. Mater. Chem. A* 2020, 8, 13671–13678.



UDK: 524

Salakhutdin NURITDINOV

Professor of National university of Uzbekistan

E-mail: nur200848@mail.ru

Sobir TURAEV

PhD student of National university of Uzbekistan

Aleksey RASTORGUEV

Professor of the Lomonosov Moscow State University

Davron RASHIDOV

Assistant of National university of Uzbekistan

O'zRFA Astronomiya instituti professori Mirtadjiyeva Karomat taqrizi asosida

DATA ANALYSIS OF SPACE OBSERVATIONS OF GLOBULAR CLUSTERS

Annotation

We have performed an analysis of observational data on the apparent surface density of 81 globular clusters obtained within the framework of the GAIA DR2 space program and published in the work of de Boer et al (2019). We first studied the quality of GAIA DR2 observational data in comparison with similar data obtained by HST. Using our 3-parameter model, previously tested on the example of HST space observation data, we found the values of the parameter of star concentration to the center of the cluster. To do this, it was first necessary to divide the GAIA data into four groups and compare their quality from a number of physical considerations. We investigated the dependence of the concentration parameter of GCs found by us on the basic characteristics of these objects. The results obtained confirm the validity of the previous classification of GCs according to the degree of star concentration to the center of the cluster.

Keywords: globular clusters, visible surface densities, space observations, concentration parameter.

АНАЛИЗ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ ЗВЕЗД

Аннотация

Мы выполнили анализ данных наблюдений видимой поверхностной плотности 81 шарового скопления, полученных в рамках космической программы GAIA DR2 и опубликованных в работе de Boer et al (2019). Нами изучено качество данных наблюдений GAIA DR2, используя нашу 3-х параметрическую модель, апробированную ранее на примере космических данных наблюдений HST. С этой целью сначала потребовалось разделить данные GAIA на четыре группы и сравнить их качество из ряда физических соображений. Исследована зависимость найденных нами параметра концентрации ШС от основных характеристик этих объектов. На основе полученных нами результатов, мы предлагаем классификацию ШС по степени концентрации звезд к центру скопления.

SHARSIMON YULDUZ TO'DALARINING KOSMIK KUZATUV MA'LUMOTLARI TAHLILI

Annotatsiya

Biz GAIA DR2 kosmik dasturi doirasida olingan va de Boer et al. (2019) ishida nashr etilgan 81 ta sharsimon yulduz to'dalari (ShYT)ning ko'rinma sirt zichligi bo'yicha kuzatuv ma'lumotlarini tahlil qildik. Biz birinchi navbatda GAIA DR2 kuzatuv ma'lumotlarining sifatini HST tomonidan olingan shunga o'xshash ma'lumotlar bilan taqqoslab o'rgandik. Ilgari HST kosmik kuzatuv ma'lumotlari misolida sinovdan o'tgan 3 parametrlil modelimizdan foydalanib, biz konsentratsiya parametrining to'da markazigacha bo'lgan qiymatlarini topdik. Buning uchun birinchi navbatda GAIA ma'lumotlarini to'rt guruhga bo'lish va ularning sifatini bir qator jismoniy jihatlardan solishtirish kerak edi. Biz topilgan ShYT larning konsentratsiya parametrining ushbu ob'ektlarning asosiy xususiyatlariga bog'liqligini tekshirdik. Olingan natijalar klaster markaziga yulduz konsentratsiyasi darajasi bo'yicha GK larning oldingi tasnifining to'g'riligini tasdiqlaydi.

Ключевые слова: шаровые скопления, видимые поверхностные плотности, космические наблюдения, параметр концентрации.

Introduction. To date, 157 globular clusters (GCs) of stars have been identified, but far from all of them have been observed for surface density using space telescopes. Initially, ground-based methods of photographic astrometry and stellar astronomy were used to determine the structural parameters of GCs (see, for example, [1, 2-4]). Since the number density towards the center of GCs increases rapidly, it is difficult for ground-based telescopes to analyze their central region (for details see, for example, [5]) and CCD observations are necessary. In rare cases, several deep observations of the surface density of specific GCs were carried out [6]. As of today, one can note the observational data on the surface density for 26 GCs, carried out within the framework of the HST space program and published [7], as well as data from the GAIA DR2 space program processed [8]. Nuritdinov et al. (2022) [9] found values of the degree of concentration parameter for these 26 GCs and for the first time proposed a classification of GCs that solves the problem of Shepley-Sawyer (1927) [1]. Naturally, the question arises: how much can the values of the degree of concentration parameter differ for other GCs? Unfortunately,

there are no data for other GCs within the framework of the HST program. That is why it is necessary to analyze and calculate the concentration parameter for 81 GCs provided by the GAIA DR2 Space Program [8]. Despite the fact that the quality of these data is somewhat inferior to HST data, we have studied each GC in sufficient detail. An analysis of the quality of the observational data and the behavior of the surface density for 81 GCs shows the need to divide them into four groups (see Section 2 below). It turned out that only for one of them it makes sense to determine the values of the GC concentration degree parameter and the corresponding empirical formulas for the dependence of this parameter on the main physical characteristics of the clusters. The values of correlation coefficients between the concentration parameter and individual physical characteristics obtained from observations were found, including with the mass of GCs, absolute magnitude, King's parameter [10] and GC index of richness (IR) [11]. During the analysis of the problem, the main differences between GAIA DR2 and HST observational data were studied in detail.

Analysis of GCs observation data within the GAIA DR2 program. Observational data on the surface density of GCs obtained by space telescopes within two programs (GAIA DR2 and HST) differ significantly in quality from each other. Below we will try to indicate these differences one by one. Let's start with the fact that 20 GCs were observed by both GAIA DR2 and HST. The surface density profiles of most of these GCs obtained from different space telescopes clearly differ in star concentration, data uniformity and smoothness of apparent surface density. It is known that the concentration of stars in globular clusters increases uniformly towards the center. However, 7 out of 81 globular clusters observed by GAIA DR2 (TER 8, NGC 7492, PAL 12, PAL 1, NGC 6218, NGC 6362, NGC 6496) have very uneven density profiles towards the center, while these unevennesses are almost absent in observational data obtained within HST. This can be seen on the example of NGC 7492 (fig. 1). This situation creates serious difficulties in analyzing such GCs.

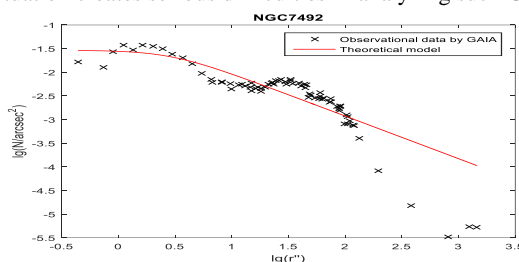


Fig. 1. Observational data for NGC 7492 on GAIA DR2.

Further, we note that out of the remaining 74 GCs in 16 cases (IC 4499, NGC 288, NGC 5024, NGC 5053, NGC 5139, NGC 5466, NGC 5897, NGC 6101, NGC 6121, NGC 6144, NGC 6235, NGC 6254, NGC 6366, NGC 6809, PAL 11, PAL 14), the central part has a complex and physically unexplainable picture of the density profile. In addition, most GCs have density profiles that start not from the center but most often from a value of $lg(r'') \sim -0.5$. We see this on the example of NGC 6934 (fig. 2). The density profiles of the above-mentioned 16 GCs start at a distance of $lg(r'') \sim +0.4$ from the center. We can see this on the example of NGC 6254 (fig.3). Density fluctuations in the central region and on the periphery (fig.3) also create difficulties in calculating the degree of concentration. The fact is that the absence of a density value in the center seriously affects the value of the concentration parameter.

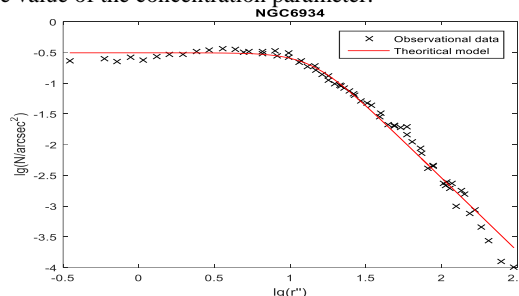


Fig. 2. Peculiarities in the density drop in the central region and at the periphery for NGC 6934.

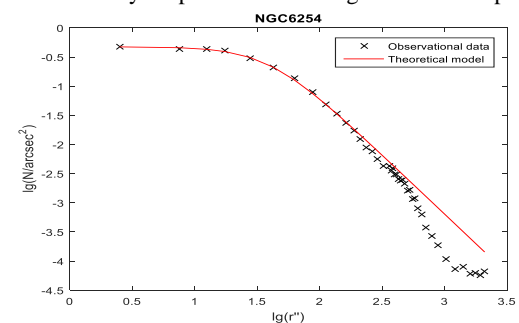


Fig. 3. Peculiarities in the density drop in the central region and at the periphery for NGC 5024.

Note that although the density profiles of GCs obtained by HST sometimes have relatively few observation points compared to the GAIA data, but on the other hand the concentration in the first case increases uniformly towards the center, while in the second case non-uniformity is observed both in distance from the center and in the value of the surface density itself. These differences are shown on the example of NGC 6809 (fig. 4).

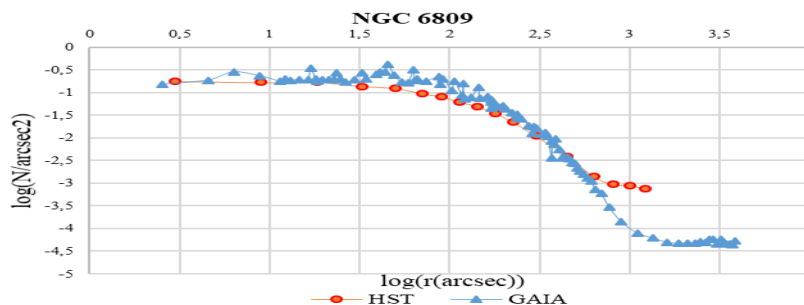


Fig. 4. Comparison of density profiles of NGC 6809 obtained by HST (circles) and GAIA (triangles) space telescopes.

The features shown in figs. 1-4 cause serious problems when calculating the concentration parameter of GCs. Thus, we are forced to divide clusters into 4 groups:

- 1) clusters observed by GAIA and HST (there are 20 of them);
- 2) clusters with oscillating density profiles in central regions (there are 17 GCs);
- 3) clusters with weak concentration in the central region or with concentration towards the periphery, and the density profile only satisfies requirements on some sections (12 GCs);
- 4) clusters for which the observed density profile is uniform and smooth everywhere, especially in the central region (there are only 32 of them).

As can be seen, only those clusters that are included in the last group deserve to determine the values of the concentration parameter for them.

Determination of the concentration parameter from GAIA DR2 observational data. As noted above, Nuritdinov et al. in their work [9] analyzed the degree of concentration in 26 GCs, the observational data of which are given in the work of [7]. For this purpose, in [9] the King model ($\sigma \sim [1 + r^2/r_0^2]^{-\gamma}$) was first generalized in the following form:

$$\sigma(r, \gamma, r_0, \sigma_0) = \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right]^{-\gamma} \tag{1}$$

Here γ , r_0 and σ_0 are free parameters, γ is the degree of star concentration towards the center of the cluster, r_0 is the core radius of the cluster, σ_0 is the surface density at the center of the GC. The authors [9] calculated the above-mentioned free parameters for 26 GCs and found good correlations between these quantities and the observed main parameters of clusters.

As a logical continuation of the work of [9], we calculated free parameters of GCs based on model (1) using data for surface density in a sample of 32 GCs noted in the previous section of this article. The chi-square minimization method was used to calculate parameters:

$$\chi^2 = \sum_n \frac{[\sigma_{obs}^{(n)} - \sigma(r_n, \sigma_0, r_0, \gamma)]^2}{\sigma(r_n, \sigma_0, r_0, \gamma)} \tag{2}$$

The calculated free parameters and their uncertainties are given in Table 1.

Table 1. Values of free parameters of GC and errors in their determination.

GC name	γ	$\Delta\gamma$	r_0	Δr_0	σ_0	$\Delta\sigma_0$
NGC 104	.97	.15	03 22,	.01 4	.37 7	.40 0
NGC 288	.24	.50	30 85,	5,01 3	.14 0	.01 0
NGC 362	.82	.11	8 7,8	.26 1	3,63 1	.56 0
NGC 1851	.26	.68	9 5,3	.75 2	3,52 2	.08 2
NGC 1904	.02	.40	5 8,6	.67 4	.38 4	.20 1
NGC 2808	.87	.06	51 12,	.05 1	1,90 1	.28 0
NGC 4590	.32	.44	17 43,	3,64 1	.63 0	.06 0
NGC 5024	.07	.31	93 23,	.98 8	.37 0	.05 0
NGC 5272	.12	.67	24 25,	7,69 1	.55 1	.41 0
NGC 5286	.24	.38	38 18,	.10 5	.48 1	.07 0
NGC 5466	.50	.60	.18 107	4,30 4	.02 0	.002 0
NGC 5694	.93	.14	4 3,3	.63 0	.25 1	.06 0
NGC 5824	.94	.09	5 3,2	.49 0	.65 6	.44 0
NGC 5904	.73	.25	32 16,	.62 8	.22 2	.41 0
NGC 6093	.01	.23	4 7,4	.17 2	.94 6	.99 0
NGC 6101	.61	.62	53 79,	0,30 3	.06 0	.01 0
NGC 6144	.64	.14	73 25,	2,94 1	.03 0	.01 0
NGC 6171	.30	.44	32 36,	0,81 1	.30 0	.02 0

NGC 6205	.12	.30	29	45,	1	1	0
NGC 6229	.16	.61	0	9,1	3,66	.81	.15
NGC 6254	.10	.50	95	40,	5	.72	.16
NGC 6266	.61	.07	0	5,7	2	0	0
NGC 6273	.92	.13	36	22,	1	.98	.24
NGC 6341	.17	.63	58	16,	3	.22	.08
NGC 6356	.81	.07	67	10,	1	.49	.73
NGC 6388	.63	.08	5	4,3	0,35	.20	.01
NGC 6496	.73	.80	00	70,	1	0	0
NGC 6569	.36	.30	61	24,	2	.03	.01
NGC 6626	.93	.18	13	12,	4	0	0
NGC 6656	.17	.34	92	80,	2	.08	.01
NGC 6715	.91	.06	5	5,3	0	.19	.09
NGC 7089	.99	.46	00	14,	8	.40	.36

As can be seen from Table 1, the errors in determining the values of the free parameters of model (1) are quite acceptable.

We also looked for a correlation between the parameter γ and the main physical characteristics of GCs. In this case, obviously, only 32 GCs given in Table 1 were considered. Next, we calculated the corresponding correlation coefficients and found empirical dependencies of γ on the main physical characteristics taken from the catalogs of Harris [12] and Baumgardt [13].

The dependence between γ and absolute magnitude M_V . The correlation coefficient between these quantities is 0,70. The corresponding empirical formula has the form

$$\gamma = 0,21(\pm 0,04)M_V + 2,87(\pm 0,33), \quad (3)$$

or vice versa

$$M_V = 2,30(\pm 0,43)\gamma - 10,86(\pm 0,47). \quad (4)$$

Dependence of the parameter γ on the King parameter "c". Here the correlation coefficient is very good and equal to $-0,77$. The empirical relationship looks like this

$$\gamma = -0,61(\pm 0,09)c + 2,04(\pm 0,15), \quad (5)$$

and vice versa

$$c = -0,96(\pm 0,15)\gamma + 2,59(\pm 0,16). \quad (6)$$

The dependence between γ and the mass of GCs. The correlation coefficient is also good and equal to $-0,71$. Empirical formula:

$$\gamma = -0,49(\pm 0,09)lg \frac{\mathcal{M}}{\mathcal{M}_\odot} + 3,81(\pm 0,49), \quad (7)$$

and vice versa

$$lg \frac{\mathcal{M}}{\mathcal{M}_\odot} = -1,04(\pm 0,19)\gamma + 6,66(\pm 0,21). \quad (8)$$

The dependence of the parameter γ on Kukarkin's "index of richness". We found a good correlation equal to $-0,71$. Empirical formula:

$$\gamma = -1,01(\pm 0,18)IR + 1,69(\pm 0,12), \quad (9)$$

or if expressed through

$$IR = -0,50(\pm 0,09)\gamma + 1,15(\pm 0,10). \quad (10)$$

For reference, we note that the values of the index are given in the article [11].

Conclusion. Analysis and comparison of observational data on the apparent surface density of GCs obtained by the GAIA DR2 and HST space programs have been performed. It is noted that the quality of the GAIA observational data is somewhat inferior to the HST data. Therefore, we were forced to create a normal sample from the GAIA DR2 observational data. Using a 3-parameter model (1) and applying the chi-square minimization method, we found the values of the GC concentration parameter. The correlation coefficients of the concentration parameter γ with the main physical characteristics of GCs (M_V , $lg \mathcal{M}$, c , IR) were calculated and the corresponding empirical formulas for dependence were found. These results were determined for 32 GCs observed within GAIA DR2. The found values of γ are in the interval (0,61; 1,73), which shows the validity of our previous GC classification, developed by us based on the results of the analysis of HST observational data.

REFERENCES

1. Shapley H., Sawyer H.B., Harvard Obs. Bull., Volume 849, 11 (1927).
2. Grillmair Carl J. et al., Globular Clusters with Tidal Tails: Deep Two-Color Star Counts, The Astronomical Journal, Volume 109, February 1995.
3. Lehmann I., Scholz R.D., Tidal radii of the globular clusters M 5, M 12, M 13, M 15, M 53, NGC 5053 and NGC 5466 from automated star counts, Astron. Astrophys., Volume 320, 776–782, 1997.

4. Testa V. et al., Use of DPOSS data to study globular cluster halos: an application to M 92, arXiv:astro-ph/0002280v1, 14 Feb 2000.
5. Carballo-Bello Julio A. et al., Outer density profiles of 19 Galactic globular clusters from deep and wide-field imaging, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, Volume 419, 14–28, 2012.
6. Di Cecco A. et al., On the density profile of the globular cluster M92, arXiv:1302.1714v1 [astro-ph.SR], 7 Feb 2013.
7. Miocchi P. et al., Star count density profiles and structural parameters of 26 galactic globular clusters, *The Astrophysical Journal*, Volume 774, 151 (16pp), 2013.
8. de Boer T.J.L. et al., Globular cluster number density profiles using Gaia DR2, arXiv:1901.08072v2 [astro-ph.GA], 5 Mar 2019.
9. Nuritdinov S.N. et al., To the Globular Cluster Classification Problem. Calculating the Concentration of Stars for 26 Clusters, ISSN 1063-7737, 2021.
10. King Ivan R., The structure of star clusters. III. Some simple dynamical models, *Astronomical Journal*, Volume 71, p. 64, 1966.
11. Kukarkin B.V., The concentration classes of globular clusters, *Sov. Astron.*, Volume 15, 89-94, 1971.
12. Harris William E., A New Catalog of Globular Clusters in the Milky Way, arXiv:1012.3224 [astro-ph.GA], 15 Dec 2010.
13. Baumgardt H., Hilker M., A catalogue of masses, structural parameters and velocity dispersion profiles of 112 Milky Way globular clusters, arxiv.org/abs/1804.08359v2, 23 Apr 2018.



UDK: 544.272

Umida RAMAZANOVA,

O'zbekiston Milliy universiteti magistranti

E-mail: umidaramazanova432@gmail.com

Shaxrizoda MATNAZAROVA,

O'zR FA, Ion-Plazma va Lazer Texnologiyalari instituti muhandisi

E-mail: shahrizodamatnazarova300@gmail.com

Turg'unali AXMADJANOV,

O'zbekiston Milliy universiteti Fizika fakulteti Fotonika kafedrtasi mudiri

E-mail: t.akhmadjanov@nuu.uz

Umedjon XALILOV,

O'zR FA, Ion-Plazma va Lazer Texnologiyalari instituti bosh ilmiy xodimi

E-mail: umedjon.khalilov@outlook.com

Maksudbek YUSUPOV,

O'zR FA, Ion-Plazma va Lazer Texnologiyalari instituti bosh ilmiy xodimi

E-mail: maksudbek.yusupov@outlook.com

Geologiya fanlari universiteti dotsenti f.-m.f.d. X. Raximov taqrizi asosida

COLD ATMOSPHERIC PLASMA OXIDATION OF OLIGOSACCHARIDE: ATOMIC LEVEL MODELING

Annotation

Cold atmospheric plasma (CAP) is effectively used in several medical fields, particularly in the removal of biofilms from surfaces. However, the molecular mechanisms of CAP effects are still poorly understood. In this study, the mechanisms of CAP-induced oxidation of oligosaccharides were studied using reactive molecular dynamics (MD) simulations. In particular, the processes of interaction of reactive oxygen and nitrogen species formed by CAP with cellotriose (a model system for oligosaccharides) were studied. Simulation results showed that when reactive oxygen particles interact with cellotriose, they dissociate the structurally important glycosidic bonds of the molecule. This leads to the destruction of the oligosaccharide molecule. These MD results were in agreement with the experimental results on the oxidation of cellotriose by CAP.

Keywords: Cold atmospheric plasma, reactive oxygen and nitrogen species, oligosaccharide, plasma oxidation, reactive molecular dynamics.

ОКИСЛЕНИЕ ОЛИГОСАХАРИДА ХОЛОДНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ: МОДЕЛИРОВАНИЕ НА АТОМНОМ УРОВНЕ

Аннотация

Холодная атмосферная плазма (ХАП) эффективно используется в ряде областей медицины, в частности, при удалении биопленок с поверхностей. Однако молекулярные механизмы эффектов ХАП до сих пор плохо изучены. В этом исследовании механизмы ХАП-индуцированного окисления олигосахаридов изучались с использованием моделирования реактивной молекулярной динамики (МД). В частности, изучались процессы взаимодействия активных форм кислорода и азота, образуемых ХАП, с целлотриозой (модельная система для олигосахаридов). Результаты моделирования показали, что при взаимодействии частиц активного кислорода с целлотриозой происходит диссоциация структурно важных гликозидных связей молекулы. Это приводит к разрушению молекулы олигосахаридов. Эти результаты МД согласовывались с экспериментальными результатами по окислению целлотриозы с помощью ХАП.

Ключевые слова: холодная атмосферная плазма, активные формы кислорода и азота, олигосахариды, плазменное окисление, реактивная молекулярная динамика.

SOVUQ ATMOSFERIK PLAZMA YORDAMIDA OLIGOSAXARIDNING OKSIDLANISHI: ATOMAR DARAJADAGI MODELLASHTIRISH

Annotatsiya

Sovuq atmosferik plazma (SAP) bir nechta tibbiyot sohalarida, xususan sirtlardan biofilmlarni tozalashda samarali qo'llanilmoqda. Biroq, SAP ta'sirining molekulyar mexanizmlari hali ham yaxshi tushunilmagan. Ushbu tadqiqot ishida reaktiv molekulyar dinamika (MD) simulyatsiyalari yordamida oligosaxaridlarning SAP ta'sirida oksidlanish mexanizmlari o'rganildi. Xususan, SAP hosil qilgan reaktiv kislorod va azot turlarining sellotriozga (oligosaxaridlar uchun model tizim) bilan o'zaro ta'siri jarayonlari tadqiq etildi. Modellashtirish natijalari reaktiv kislorod zarralari sellotriozga bilan o'zaro ta'sirlashganda molekulaning strukturaviy muhim bo'lgan glikozid bog'larini uzishini ko'rsatdi. Bu esa oligosaxarid molekulasining parchalanishiga olib keladi. Ushbu MD natijalar SAP orqali sellotriozga oksidlanishi bo'yicha eksperimental natijalar bilan mos keldi.

Kalit so'zlar: Sovuq atmosferik plazma, reaktiv kislorod va azot turlari, oligosaxarid, plazma yordamida oksidlash, reaktiv molekulyar dinamika.

Kirish. Biofilmlarning ko'payishi sog'liqni saqlash sohalarida bir qancha jiddiy muammolarni keltirib chiqarmoqda [1]. Ayniqsa, ularning jonli hamda jonsiz sirtlarda o'sa olish imkoniyati ko'plab muammolarga sabab bo'lmoqda [2,3]. Biofilmlarning ko'payishi sikli bakteriyalarning sirtga turli darajadagi yopishishi bilan bog'liq, ya'ni u bakteriyalarning sirtidagi o'zaro ta'siridan boshlanib, hujayra klasterlarining biofilm matritsasidan ajralib chiqishi bilan yakunlanadi [4,5].

Biofilm tarkibi oqsillar, nuklein kislotalar, aminokislotalar va polisaxaridlardan iborat [6]. Polisaxaridlar biofilm tarkibidagi polimer modda bo'lib, bakteriyalarni antibiotiklardan himoya qilish vazifasini bajaradi. Ushbu polisaxaridlar sababli an'anaviy sterilizatsiya usullari, ya'ni kimyoviy tozalash, avtoklav va rentgen nurlanishi yordamida tibbiy asbob-uskunalarini biofilmlardan (xususan, bakteriyalardan) tozalashda samarali natija bermaydi. Shu sababli, so'nggi yillarda, sovuq atmosferik plazma (SAP) biofilmlarni yo'q qilishda, ya'ni sirtini zararsizlantirishda yaxshi nomzod sifatida qo'llanila boshlandi [7,8]. SAP ko'plab inaktivatsiya mexanizmlaridan, masalan, biofilm to'plamlarini va ularning hosil bo'lishida muhim rol o'ynaydigan matritsa tarkibiy qismlari (masalan: oligosaxaridlar)ni beqarorlashtirish kabi mexanizmlardan foydalanadi [9]. Xususan, yaqinda o'tkazilgan tadqiqotda, *Escherichia coli* va *Staphylococcus aureus* biofilmlarini yo'q qilish uchun havo-dielektrik to'siqli razryad (havo-DTR) plazmasidan foydalanilgan [10]. Bunda, deyarli 4 daqiqadan so'ng, *Escherichia coli* ning 85% dan ortig'i va *Staphylococcus aureus* biofilmlarining 70% dan ko'prog'i metabolik qobiliyatini yo'qotgan. Bundan tashqari, havo-DTR bilan ishlov berish ikkala biofilmlarning membranalarini sezilarli darajada buzilishiga olib kelgan [10]. Boshqa bir tadqiqotda esa, SAP ning *Streptococcus mutans* biofilmlariga qarshi antimikrob ta'siri o'rganilgan va natijalar 2% xlorgeksidin yordamida olingan natijalar bilan taqqoslangan [11]. Yashovchan koloniyalar (masalan, koloniya hosil qiluvchi birlik [KHB])ni hisoblash va biolyuminesensiya tahlili (BL) 150 s vaqt davom etgan SAP ta'siri KHB va BL qiymatlarini dastlabki qiymatlarga nisbatan sezilarli darajada kamaytirganini ko'rsatgan. Biroq 2% xlorgeksidin SAP bilan ishlov berishga qaraganda kuchliroq ta'sir ko'rsatgani aniqlangan. Boshqa tomondan, xlorgeksidin ta'siridan keyin biofilmda strukturaviy yoki morfologik o'zgarishlar kuzatilmagan, SAP bilan ishlov berishda esa bu o'zgarishlarning aniq belgilari ko'ringan. Undan tashqari, plazma bilan ishlov berilgandan keyin xlorgeksidinda kuzatilmagan holat, ya'ni DNK ning shikastlanishi aniqlangan. Mualliflar biofilmlarni yo'q qilishda kimyoviy (xlorgeksidin) ta'sirdan ko'ra SAP bilan ishlov berish og'iz ichi bo'shlig'ini kamroq zararsizlantirish strategiyasi sifatida SAPdan foydalanish mumkinligini taklif qilishgan [11].

Antibiotiklar biofilm matritsasiga past kiruvchanlikka ega va shu sababli, biofilm ichida joylashgan bakteriyalar antimikrob va antibiotik dorilarga nisbatan yuqori qarshilik ko'rsatadi [12,13]. Boshqa tarafdin, SAP hosil qilgan reaktiv kislorod va azot turlari (RKAT) biofilmga chuqur kirib borish imkoniyatiga ega [14]. Bundan tashqari, plazmaning biofilm bilan o'zaro ta'sirida hosil bo'lgan ikkilamchi RKAT bakteriya hujayrasi tashqarisidagi polimer moddaning qalinligini kamaytiradi, bu esa bakteriya hujayrasining SAP ga sezuvchanligini oshiradi [15]. Biofilmlarning buzilishi va bakteriyalarni yo'q qilishning ushbu o'ziga xos mexanizmi sababli biofilm SAP tomonidan hosil qilingan oksidlovchi stressga nisbatan qarshilikni rivojlantirishi qiyin. Bu esa SAPni infeksiyal va bakteriyaviy patogenlarga qarshi samarali usul deb hisoblash imkonini beradi. Adabiyotlarda SAP ning antimikrobial ta'siri yaxshi o'rganilgan bo'lsada [16], biofilm tarkibining murakkabligi tufayli SAP ta'sirining molekulyar mexanizmlari hali ham yaxshi tadqiq etilmagan. Shu jihatdan, biofilm komponentlaridan biri bo'lmish polisaxaridlar bilan plazma ta'sirini molekulyar darajada tushunish juda muhim hisoblanadi.

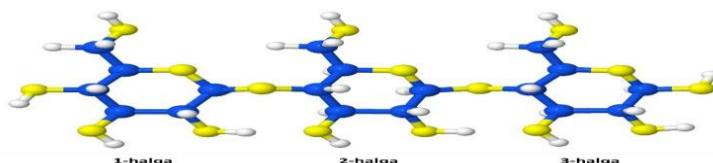
Soigent va boshqalar O_2 , N_2 va Ar gazlari orqali hosil qilingan RF (radio chastotali) plazma yordamida mono- va polisaxaridlar kimyoviy o'zgarishga uchraganligini aniqlashgan [17]. Mualliflar ta'kidlashicha, plazma bilan ishlov berish natijasida har bir monosaxarid birligida o'rtacha bitta karbonil guruhi hosil bo'lgan. Ushbu karbonil guruhlari SAP bilan ishlov berilgan monosaxaridlarning ichki qismida va yuzasida hosil bo'lgan [17]. Li va boshqalar glyukozaning suvli eritmasiga DTR plazmasi bilan ishlov berish asosan kislotalar (masalan, oksalik, glikolik, tartarik, glitserik va chumoli kislotasi) hosil bo'lishiga olib kelishini ko'rsatgan. Bunda RKT, xususan, gidroksil radikallari asosiy rolni o'ynashi aniqlangan [18]. Shunga o'xshash xulosa yaqinda o'tkazilgan tajribada, ya'ni SAP hosil qilgan reaktiv turlari tomonidan D-glyukoza oksidlanishi tadqiqotida ham qilingan [19]. Tajribalar gidroksil (OH) radikallari va ayniqsa kislorod atomlari (ya'ni $O(^3P)$ radikallari yoki oddiy O atomlari) kabi qisqa-yashovchi zarralar glukoza oksidlanishida asosiy rol o'ynaydigan reaktiv turlari ekanligini, uzoq yashovchi vodorod peroksidi H_2O_2 esa oksidlanishda ahamiyatsiz ekanligini ko'rsatgan. Mualliflar, shuningdek, Ar/ O_2 aralashmali (N_2 himoya oqimli yoki oqimsiz) plazmada glyukozaning asosiy oksidlovchilari O atomlari ekanligini ta'kidlaganlar [19]. Shunga o'xshash bayonot [20] da xabar qilingan, ya'ni O atomlari suvli eritmada hech qanday oraliq reaksiyalarisiz (ya'ni, suv molekularining dissotsiatsiyasi sodir bo'lmasdan) bevosita organik molekullarni oksidlashi mumkinligi aytilgan. Unda aytilishicha, suyuq fazada kimyoviy prekursorlarga ehtiyoj bo'lmagan holda SAPdan O atomlarning effektiv manbasi sifatida foydalanish mumkin [20]. Almeida va boshqalar, bevosita va bilvosita plazma bilan ishlov berish jarayonida oligosaxaridlar zanjiri uzunligining to'rtinchi yettigacha glikozid bog'li saxarid monomerlariga qisqarishini ko'rsatishgan; shu kabi SAP effekti fruktozoda ham kuzatilgan [21]. Mualliflarning fikriga ko'ra, bevosita yoki bilvosita SAP bilan ishlov berish plazma reaktiv turlarning reaksiyasi tufayli glikozid bog'larining uzilishiga olib keladi [21]. Delaux va boshqalar SAP hosil qilgan reaktiv turlarining selluloza bilan o'zaro ta'siri glikozid bog'larning uzilishiga va qisqa zanjirli sellodekstrinlarning ajralib chiqishiga, bu esa natijada tarmoqlangan glyukanlarning hosil bo'lishiga olib kelishini ko'rsatgan [22]. Shunga qaramay, yuqoridagi eksperimental natijalar plazmaning oligosaxaridlarga ta'siri haqida cheklangan tushunchalarni beradi va uning ta'sir qilish molekulyar mexanizmlarini tushuntirib bera olmaydi.

Shu nuqtai nazardan, ushbu tadqiqot ishida SAP hosil qilgan RKAT bilan biofilmlarning asosiy tarkibiy qismlaridan biri bo'lgan oligosaxarid uchun tanlangan model tizim o'zaro ta'siri o'rganiladi. Xususan, reaktiv molekulyar dinamika (MD) simulyatsiyalarini bajarish orqali RKATning sellotrioza molekulasi bilan o'zaro ta'siri mexanizmlari tadqiq etiladi.

Modellashtirish tafsilotlari. Plazmaning sellotrioza ta'sirini yaxshiroq tushunish, ya'ni SAP hosil qilgan RKATning sellotrioza bilan o'zaro ta'sir mexanizmlarini atomar darajada tadqiq etish uchun zichlik funksionali-mustahkam

bog'lanish (density functional based tight binding-DFTB) potensialidan [23] foydalangan holda reaktiv MD simulyatsiyalari amalga oshirildi. DFTB approksimatsiyali zichlik funksionali nazariyasi (density functional theory-DFT) usuli bo'lib, DFT umumiy energiya ifodasini Teylor qatoriga yoyishga asoslangan. DFTB hisoblash jihatidan DFTga nisbatan ikki marta tez [23], ammo ReaxFF-MD kabi klassik reaktiv MD usullariga qaraganda ancha sekin [24]. Biroq, u tezlik va aniqlikni yo'qotmasdan H o'tish energiya to'siqlarini, proton yaqinlashuvini va H bog'lanish energiyasini aniq ifodalaydi [25]. Bundan tashqari, u ReaxFF-MD aniq ifodalay olmaydigan rezonans strukturalarni to'g'ri tavsiflashi mumkin [26]. Ushbu tadqiqot ishida DFTBning kengaytirilgan va takomillashtirilgan DFTB3 versiyasidan hamda atomlar orasidagi o'zaro ta'sirlarni ifodalash uchun "3ob-3-1" parametrlar to'plamidan foydalanildi [25]. Ushbu parametrlar to'plami DFTB3 uchun maxsus ishlab chiqilgan bo'lib, u organik molekular hamda bio-molekular uchun ishlatilishi mumkin [27,28].

Oligosaxarid uchun model tizim sifatida sellotrioza strukturasidan foydalanildi (1-rasm). Sellotrioza trisaxarid strukturasi 1,4- β glikozid bog'lari orqali bog'langan uchta β -D-glyukoza monomerlaridan iborat. SAP hosil qilgan RKAT (ya'ni, O, *OH, HO₂^{*}, H₂O₂, O₃, *NO, *NO₂, NO₂⁻ va NO₃⁻) bilan sellotrioza o'zaro ta'sirida molekulada mavjud bog'larning barcha mumkin bo'lgan uzilish va hosil bo'lish jarayonlari batafsil o'rganilishi hamda ba'zi (cheklangan) statistik ma'lumotlarni olish uchun ko'p sonli DFTB-MD simulyatsiyalari amalga oshirilishi kerak. Shu sababli ushbu tadqiqot ishida, RKAT va sellotrioza trisaxaridi o'zaro ta'sirining mumkin bo'lgan barcha reaksiya mexanizmlarini o'rganish uchun 100 ta DFTB-MD simulyatsiyalari amalga oshirildi. Shuni ta'kidlash kerakki, DFTB usulida tizimni suv qatlami bilan modellashirish juda uzoq hisoblash vaqtini talab qilganligi sababli, ushbu ishda sellotrioza molekulasining suv bilan qoplangan qatlami hisobga olinmadi. Shunday bo'lsa-da, ushbu ishdagi simulyatsiya natijalari sifat jihatidan eksperimental natijalarga mos keldi (natijalar va ularning muhokamasi bo'limiga qarang), bu esa tadqiqotlarda qo'llanilgan yondashuv (ya'ni, suv qatlamisiz sellotrioza bilan foydalanish) yetarlicha asoslanganligini ko'rsatadi.

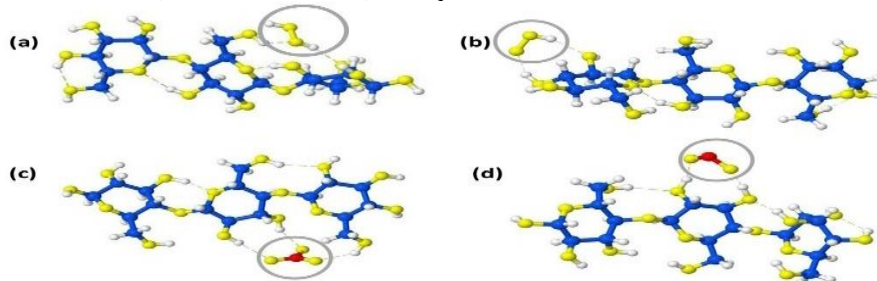


1-rasm. Uchta β -D-glyukoza monomeridan, ya'ni uchta halqadan tashkil topgan sellotrioza molekulasining sxematik ko'rinishi. C, O va H atomlari, mos ravishda, ko'k, sariq va oq ranglarda ko'rsatilgan.

Sellotrioza molekulasini (66 ta atomdan iborat, 1-rasmga qarang) o'lchamlari 25 Å × 25 Å × 25 Å bo'lgan simulyatsiya qutisiga joylashtirildi. Ushbu simulyatsiya qutisining o'lchami model molekula atrofida bitta tasodifiy RKATni hosil qilish uchun yetarlicha katta qilib olindi va uchchala yo'nalish bo'yab davriy chegaraviy shartlar qo'llanildi.

Dastlab, sellotrioza energiyasi birlashgan gradient usuli yordamida minimallashtirildi. So'ngra, ushbu molekula 15 ps vaqt davomida NVT (ya'ni, tizimdagi zarralar soni N, hajmi V va harorati T saqlanadigan) ansambl yordamida 300 K ga qizdirildi. Bunda Berendsen termostatidan foydalanildi va ulanish davriyligi 0.1 ps qilib olindi [29]. Barcha MD modellashirishlarida vaqt qadami etib 0.5 fs tanlandi. Termolizatsiya qilingan sellotrioza atrofida molekuladan minimal 5 Å masofada bitta tasodifiy RKAT (masalan, bitta *OH) hosil qilindi. Ushbu masofa zarra va sellotrioza molekulasini orasidagi dastlabki bog'lanmagan o'zaro ta'sirlarning (ya'ni, Kulon va Van der Vaals ta'sirlarning) oldini olish uchun tanlandi. Hosil qilingan zarra va sellotrioza orasidagi o'zaro ta'sir simulyatsiyalari har bir RKAT uchun 100 marta takrorlandi. Bunda har bir simulyatsiya 30 ps (ya'ni, 6×10^4 iteratsiya) davom etdi va ushbu vaqt strukturada kimyoviy bog'lar uzilishi va shakllanishini kuzatish uchun yetarli bo'ldi. Barcha simulyatsiyalar DFTB+ paketidan foydalangan holda amalga oshirildi.

Natijalar va ularning muhokamasi. Ushbu tadqiqot ishida RKAT (ya'ni, O, *OH, HO₂^{*}, H₂O₂, O₃, *NO, *NO₂, NO₂⁻ va NO₃⁻) ning sellotrioza trisaxaridi bilan o'zaro ta'sirini o'rganish uchun reaktiv DFTB-MD simulyatsiyalari amalga oshirildi. Bunda, asosan, sellotrioza sodir bo'lgan kimyoviy bog'larning hosil bo'lish va uzilish jarayonlariga e'tibor qaratildi. Olingan natijalar shuni ko'rsatdiki, simulyatsiya vaqti davrida HO₂^{*}, H₂O₂, O₃, *NO, *NO₂, NO₂⁻ va NO₃⁻ zarralar sellotrioza molekulasida hech qanday kimyoviy bog' uzilishi yoki shakllanishiga olib kelmadi, ya'ni ular faqat zaif bo'lgan bog'lanmagan o'zaro ta'sirlarda qatnashishdi. Xususan, sellotrioza HO₂^{*}, H₂O₂, NO₂⁻ va NO₃⁻ zarralar bilan zaif tortishuvchi (2-rasm), *NO va *NO₂ zarralar bilan esa zaif itaruvchi o'zaro ta'sirlarni hosil qildi. Ushbu zarralardan farqli ravishda, O₃ molekulasini qaysi tomoni (ya'ni, qaysi kislorod atomi) bilan molekulaga yaqinlashishiga qarab ikkala (ya'ni, ba'zan zaif tortishuvchi va ba'zan zaif itaruvchi) ta'sirni ko'rsatdi. Bundan tashqari, O atomlari va *OH radikalining trisaxarid bilan o'zaro ta'sirida bog'larning uzilish va hosil bo'lish jarayonlari kuzatildi. Qizig'i, bu ikkala zarraning reaksiya mexanizmlari juda o'xshash, ya'ni ikkalasi ham sellotrioza molekulasidan H atomini ajratib olib, HO* radikalini (O atomi holatida) yoki suv molekulasini (*OH radikali holatida) hosil qiladi.

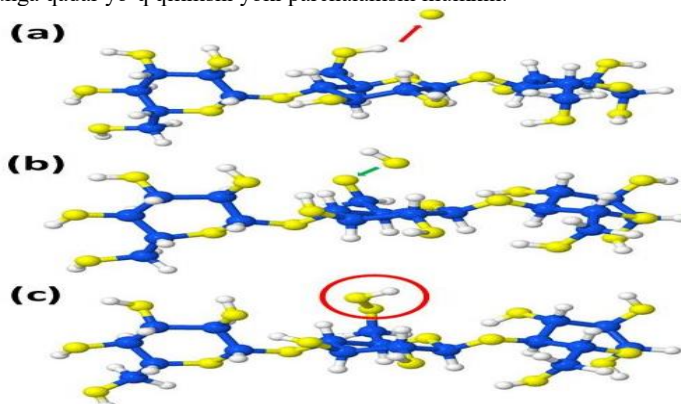


2-rasm. H₂O₂ (a), HO₂^{*} (b), NO₃⁻ (c) va NO₂⁻ (d) zarralarining sellotrioza bilan zaif tortishuvchi o'zaro ta'siri. Ushbu zarralar kulrang aylanalarda ko'rsatilgan.

Boshqacha qilib aytganda, O atomi ikkita HO' radikali vazifasini bajaradi. Shu sababli, reaksiya mexanizmlari bo'yicha statistik natijalarni olish uchun keyingi reaktiv MD simulyatsiyalarida faqat O atomlarining o'zaro ta'sir mexanizmlari tadqiq etildi. Simulyatsiya natijalari shuni ko'rsatdiki, barcha kimyoviy reaksiyalar sellotriozaning ma'lum bir qismidan (masalan, gidroksimetil guruhidan) H-abstraksiyasi bilan boshlanadi. Boshqacha qilib aytganda, O atomi H (yoki ba'zi hollarda ikkita H) atomini strukturadan ajratib oladi, bu esa keyingi dissotsiatsiyaga yoki ba'zi bog'lanishlarning shakllanishiga olib keladi.

O atomi bilan ko'p kuzatiladigan reaksiya mexanizmlaridan biri 3-rasmda tasvirlangan. Bunda, O atomi 2- (o'rta) halqadagi gidroksimetil guruhidan H atomini ajratib oladi (3a-rasm) va natijada ikkita radikal, ya'ni C-O' va 'OH hosil bo'ladi (3b-rasm). So'ngra, bu ikkala radikal bir-biri bilan o'zaro kimyoviy bog'lanib, tizimda yangi gidrosil guruhini hosil qiladi (3c-rasm).

Sellotriozaning o'rta halqasida hosil bo'lgan OOH guruhiga e'tibor berilsa, uning barqaror bo'lishligi shart emas, ya'ni orqaga qaytish reaksiyasi ham sodir bo'lishi mumkin; radikal molekular qayta tartibga solinib, keyingi qadamlarda stabilroq radikal hosil bo'lgunga qadar yo'q qilinishi yoki parchalanishi mumkin.



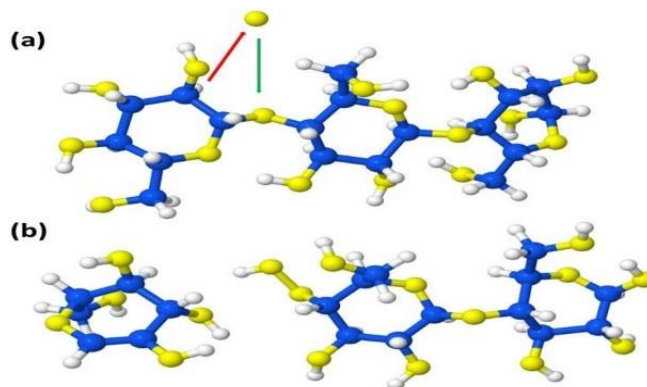
3-rasm. Sellotriozaning o'rta halqasi bilan O atomi o'zaro ta'siri reaksiya mexanizmi. Bunda, (a) O atom molekuladagi H atomini ajratib oladi (qizil ko'rsatkich), (b) hosil bo'lgan 'OH radikali C-O' bilan qayta bog'lanadi (yashil ko'rsatkich) va natijada (c) molekulada yangi OH guruhi hosil bo'ladi (qizil aylana).

Bu ishda O atomlarining molekulaga ketma-ket ta'siri o'rganilmaganligi sababli, keyingi reaksiyalar sodir bo'lishi va u orqali barqaror struktura hosil bo'lishini kuzatishning imkoniyati yo'q. Shunday bo'lsa-da, ushbu "birinchi qadam" reaksiyalari eksperiment yordamida kuzatish qiyin bo'lgan reaksiya mexanizmlarining ilk bosqichlarini tushunishga yordam beradi. Bu turdagi reaksiya mexanizmi (ya'ni, H-abstraksiyasi va OH ning keyingi bog'lanishi) sellotriozaning molekulasining boshqa qismlarida ham sodir bo'lishi mumkin va bu MD simulyatsiyalarida eng ko'p (ya'ni, umumiy simulyatsiyalarning 76%ida) kuzatilgan reaksiya mexanizmi bo'ldi. Ko'rinib turibdiki, bu reaksiya mexanizmi oxir-oqibat tizimga qo'shimcha O atomining qo'shilishiga olib keladi (+16 Da), bu esa eksperimental natijalarga mos keldi [30]. Darhaqiqat, SAP bilan ishlov berilgan sellotriozaning mass-spektrometriya natijalari molekulaga qo'shimcha O atomlari qo'shilganligini (ya'ni, OH guruhlari hosil bo'lishini) ko'rsatgan [30]. Molekulaga qo'shimcha O atomining qo'shilishi SAP yordamida D-glyukoza oksidlanishida ham kuzatilgan [19]. Natijalar plazma bilan ishlov berilgandan keyin D-glyukon kislotasi eng ko'p uchrovchi oksidlanish mahsuloti ekanligini ko'rsatgan (ya'ni glyukoza + 16 Da) [19]. Shuni ta'kidlash joizki, ushbu tadqiqot simulyatsiyalari eksperimentda kuzatilgan strukturada ikki yoki uchta qo'shimcha O atomining qo'shilishini tushuntirib berolmaydi, chunki yuqorida ta'kidlanganidek, ushbu ishda O atomlarining sellotriozaning molekulasiga ketma-ket ta'siri o'rganilmagan. Simulyatsiya natijalari boshqa reaksiya mexanizmlarini, ya'ni aldegid yoki efir yoki keton guruhlari hosil bo'lishini ham ko'rsatdi; bunda O atomi tizimdan bir vaqtning o'zida ikkita H atomini ajratib olib (ya'ni, sellotriozaning - 2 Da), suv molekulasiga aylanadi.

Ayrim reaksiya mexanizmlarida 2 ta H-abstraksiya reaksiyasidan keyin strukturada qolgan radikal joyni ko'rish mumkin va bu radikal joy yangi O atomi bilan reaksiyaga kirishishi va shu orqali karbonat yoki karboksilat efiri guruhlari hosil qilishi mumkin. Bu esa, eksperimentda kuzatilgan + 14 Da strukturaning shakllanishiga olib keladi.

Simulyatsiyalarda kuzatilgan yana bir muhim ahamiyatga ega bo'lgan reaksiya mexanizmi, ya'ni molekulada glikozid bog'ining dissotsiatsiyalanishi va natijada qo'shimcha O atomli disaxarid hosil bo'lishi mexanizmi 4-rasmda keltirilgan.

4-rasm. O atomi ta'sirida 1- (chap) va 2- (o'rta) halqalar orasidagi glikozid bog'ining uzilish mexanizmi. (a) O atomining 1-halqadan H-abstraksiyasi (qizil ko'rsatkich) va OH qo'shilish (yashil ko'rsatkich) reaksiyalari, (b) 1- va 2-halqa rasidagi glikozid bog'ining uzilishi. Natijada, disaxarid + 16 Da (o'ngda) va kamroq massaga ega monosaxarid (chapda) hosil bo'ladi.



Rasmdan ko'rinadiki, dastlab kislorod atomi 1-halqadan H atomini ajratib olib, $\cdot\text{OH}$ radikalini hosil qiladi. So'ngra, ushbu radikal 1- va 2- halqalar orasidagi glikozid bog'dagi kislorod atomi bilan bog'lanadi. Bu esa, natijada, ushbu glikozid bog'ining uzilishiga va monosaxaridda $\text{C}=\text{C}$ juft bog'ining hosil bo'lishga olib keladi (4b-rasm). Umuman, ushbu reaksiya natijasida kamroq massaga ega monosaxarid va disaxarid + 16 Da hosil bo'ladi. Yuqorida ta'kidlanganidek, 2-halqada hosil bo'lgan OOH guruhining kimyoviy barqaror bo'lishi shart emas va barqaror mahsulotlar hosil bo'lishi uchun keyingi O atom ta'siri reaksiyalari sodir bo'lishi mumkin. Ushbu reaksiyaga o'xshash reaksiya 2- (o'rta) va 3- (o'ng) halqalar orasida ham sodir bo'lishi va natijada, kamroq massaga ega disaxarid va monosaxarid + 16 Da hosil bo'lishi mumkin. Shunday qilib, ushbu tadqiqotda asosiy e'tibor SAP ta'sirida oksidlanishning ilk bosqichlarida hosil bo'ladigan boshlang'ich mahsulotlarga qaratildi. Shunga qaramay, ushbu tadqiqot natijalari eksperimental natijalarga to'liq mos keldi [30].

Xulosalar. Ushbu DFTB-MD tadqiqot ishida SAP hosil qilgan RKATning sellotrioza oligosaxaridi bilan o'zaro ta'siri mexanizmlari atomar darajada tadqiq etildi. Olingan simulyatsiya natijalari shuni ko'rsatdiki, sellotrioza HO_2^\cdot , H_2O_2 , NO_2^- va NO_3^- zarralar bilan zaif tortishuvchi, $\cdot\text{NO}$ va $\cdot\text{NO}_2$ zarralar bilan esa zaif itaruvchi o'zaro ta'sirlarni hosil qildi. Ushbu zarralardan farqli ravishda, O_3 molekulasida qaysi tomoni (ya'ni, qaysi kislorod atomi) bilan molekulaga yaqinlashishiga qarab ikkala (ya'ni, ba'zan zaif tortishuvchi va ba'zan zaif itaruvchi) ta'sirni ko'rsatdi. Sellotrioza O atomlari tomonidan oksidlanishi natijasida esa molekulaga qo'shimcha O atomlari qo'shilishi (ya'ni, gidroksil guruhlar hosil bo'lishi), aldegid yoki efir yoki keton guruhlarini hosil bo'lishi va glyukoza monomerlari orasidagi glikozid bog'larining uzilishi kuzatildi. Ushbu tadqiqot natijalari eksperimental natijalar bilan to'liq mos keldi.

Umuman olganda, ushbu tadqiqot ishi oligosaxaridlar biofilmlarning asosiy tarkibiy qismlaridan biri bo'lganligi sababli, plazma orqali biofilmlarni yo'q qilish mexanizmlarini atomar darajada tushunishga imkon beradi.

Tashakkurnoma. Ushbu tadqiqot ishi O'zbekiston Respublikasi Innovatsion rivojlanish agentligi tomonidan moliyalashtirilgan F-FA-2021-512 fundamental loyiha doirasida amalga oshirildi.

ADABIYOTLAR

1. Abdallah, M., Benoliel, C., Drider, D. et al. Biofilm formation and persistence on abiotic surfaces in the context of food and medical environments. *Arch. Microbiol.* 196, 453 (2014).
2. Akos V., Victoria H., K Scott P. Analytical challenges of microbial biofilms on medical devices. *Anal. Chem.* 84, 3858 (2012).
3. Estivill D., Arias A., Torres-Lana A. et al. Biofilm formation by five species of *Candida* on three clinical materials. *Microbiol. Methods* 86, 238 (2011)
4. S H.-. Joo, Otto M., Molecular basis of in vivo biofilm formation by bacterial pathogens. *Chem. Biol.* 19, 1503 (2012).
5. Garrett T. R., Bhakoo M., Zhang Z., Bacterial adhesion and biofilms on surfaces. *Prog. Nat. Sci.* 18,1049 (2008).
6. Flemming H.-C., Neu T. R., Wozniak D. J., The EPS J., matrix: the 'house of biofilm cells. *Bacteriol.* 189, 7945 (2007).
7. Mai-Prochnow A., Bradbury M., Ostrikov K. et al. *Pseudomonas aeruginosa* Biofilm Response and Resistance to Cold Atmospheric Pressure Plasma Is Linked to the Redox-Active Molecule Phenazine. *PLoS One*, 10, e0130373 (2015).
8. Mai-Prochnow A., Chapter 4-Cold Plasma to Control Biofilms on Food and in the Food-Processing Environment, Academic Press, 109, 143 (2020).
9. Mai-Prochnow A., Zhou R., Zhang T. et al. Interactions of plasma-activated water with biofilms: inactivation, dispersal effects and mechanisms of action. *NPJ BiofilmsMicrobio*, 7, 1 (2021)
10. Khosravi S., Jafari S., Zamani H. and et al. Inactivation of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* Biofilms by Air-Based Atmospheric-Pressure DBD Plasma. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 193, 3641. (2021).
11. Nima G., Harth-Chu E., Hiers R. D. and et al. Antibacterial efficacy of non-thermal atmospheric plasma against *Streptococcus mutans* biofilm grown on the surfaces of restorative resin composites. *Sci.Rep.* 11, 23800, (2021).
12. Lahiri D., Dash S., Dutta and R. et al. Elucidating the effect of anti-biofilm activity of bioactive compounds extracted from plants. *Biosci.* 44, 52 (2019).
13. Tanhay Mangoudehi H., Zamani H., Shahangian S. S. and et al. Effect of curcumin on the expression of *ahyI/R* quorum sensing genes and some associated phenotypes in pathogenic *Aeromonas hydrophila* fish isolates. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 36, 70 (2020).
14. Pei X., Lu X., Liu J., Liu et al D., A battery-operated atmospheric-pressure plasma wand for biomedical applications. *Appl. Phys.*, 45, 165205 (2012).

15. Bourke P., Ziuzina D., Han L. et al. Microbiological interactions with cold plasma. *J. Appl. Microbiol.*, 123, 308 (2017).
16. Christoph O., Margarete N. and Jin Ch. W. Microbial mutagenesis by atmospheric and room-temperature plasma (ARTP): the latest development. *Bioresour. Bioprocess*, 5,12 (2018)
17. . Soignet D, Hinojosa O., Ward T. et al. The effects of plasma irradiation on saccharides. *J. Macromol.Sci. Chem.*, 17, 403 (1982)
18. Li Y., Friedman G., Fridman A. et al. Decomposition of sugars under non-thermal dielectric barrier discharge plasma. *Clin. Plas. Med.*, 2, 56 (2014).
19. Ahmadi M., Nasri Z., T. von Woedtke et al. d-Glucose Oxidation by Cold Atmospheric Plasma-Induced Reactive Species. *ACS Omega*, 7, 28361 (2022).
20. Benedikt J., Mokhtar M. Hefny, Shaw A. et al. The fate of plasma-generated oxygen atoms in aqueous solutions: non-equilibrium atmospheric pressure plasmas as an efficient source of atomic O(aq). *Phys. Chem. Chem.Phys.*, 20, 12037 (2018).
21. Almeida F. D. L., Cavalcante R. S., Cullen P. J. et al. Effects of atmospheric cold plasma and ozone on prebiotic orange juice. *Innovative Food Sci. Emerg. Technol.*, 32, 127 (2015).
22. Delaux J., Ortiz C. Mellet, Canaff C., et al. Theoretical exploration of the reactivity of cellulose models under non-thermal plasma conditions—mechanistic and NBO studies. *Chem. A Eur. J.*, 22, 16522 (2016).
23. Elstner M., Porezag D., Jungnickel G., Elsner J. et al. Self-consistent-charge density-functional tight-binding method for simulations of complex materials properties. *Phys. Rev. B: Condens.Matter Mater. Phys.*, 58, 7260 (1998).
24. Elstner M., Frauenheim T., Suhai S., An approximate DFT method for QM/MM simulations of biological structures and processes. *J. Mol. Struct. Theochem*. 632, 29 (2003).
25. Gaus M., Goez A., Elstner M., Parametrization and Benchmark of DFTB3 for Organic Molecules. *J. Chem. Theory Comput.*, 9, 338 (2013).
26. Qian H.-J., van A. C. Duin, K. Morokuma, S. Irlé. Reactive molecular dynamics simulation of fullerene combustion synthesis: ReaxFF vs DFTB potentials. *J. Chem. Theory Comput.*, 7, 2040 (2011).
27. Gaus M., X. Lu, M. Elstner, Q. Cui. Parameterization of DFTB3/3OB for sulfur and phosphorus for chemical and biological applications. *J. Chem. Theory Comput.*, 10, 1518 (2014).
28. M. Kubillus, T. Kubar, M. Gaus et al. Parameterization of the DFTB3 method for Br, Ca, Cl, F, I, K, and Na in organic and biological systems. *J. Chem. Theory Comput.*, 11, 332 (2015)
29. H. J. Berendsen, J.v Postma, W. F. Van Gunsteren et al. Field-Induced Hydration Shell Reorganization Enables Electro-osmotic Flow in Nanochannels. *J. Chem. Phys.*, 81, 3684 (1984)
30. M. Yusupov, D. Dewaele, P. Attri, U. Khalilov et al. Molecular understanding of the possible mechanisms of oligosaccharide oxidation by cold plasma. *Plasma. Process. Polym.*, e2200137 (2022).



УДК:535:579.246

Фазилатхон ТУРАХОДЖАЕВА,

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А.Арифова
докторант базовой докторантуры
E-mail: bioinnovation97@gmail.com*

Илхомжон ТАЖИБАЕВ,

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А.Арифова
к.ф.-м.н., PhD., ведущий научный сотрудник
E-mail: ilhom.tojiboyev@gmail.com*

Илхом БОЙНАЗАРОВ,

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А.Арифова
докторант базовой докторантуры
E-mail: ilhomboynazarov0821@gmail.com*

Фарид РУЗИЕВ,

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А.Арифова
младший научный сотрудник
E-mail: rozdiyevf@list.ru*

Аббор ТУРГУНБАЕВ,

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А.Арифова
младший научный сотрудник
E-mail: turgunovabror@gmail.com*

Под рецензии д.ф.т.н., доцент. Ш.Б. Ташибулатов

КРИСТАЛЛООБРАЗОВАНИЕ В БАКТЕРИАЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ КАК СВЯЗУЮЩИЙ АГЕНТ ПРИ ПОВЫШЕНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация

В статье рассматриваются повышение механических свойств строительно-конструкционных объектов посредством способности микроорганизмов к образованию кристалла, механизмов их осаждения и увеличение по объёму в цементном растворе. Согласно проведенным научно-исследовательским работам, бетон с добавлением кристалл образующей биомассы даёт наилучший результат по сравнению с традиционным методом цементирования. Утверждается, что способность образования кальцит кристаллов бактериальными добавками стали основными ключевыми агентами при повышении бетонной прочности усиливая их сейсмостойкость.

Ключевые слова: кристаллообразование, бактериальная суспензия, бетон, повышение прочности, микроорганизмы.

CRYSTAL FORMATION IN BACTERIAL SUSPENSION AS A BINDING AGENT FOR INCREASING THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONSTRUCTION OBJECTS

Annotation

In the article was discussed increasing of the mechanical properties of construction and structural objects through the ability of microorganisms to form a crystal, the mechanisms of their deposition and an increase in volume in cement mortar. According to the research carried out, concrete with the addition of crystal-forming biomass gives the best result compared to the traditional method of cementing. It is claimed that the ability of calcite crystals to form bacterial additives have become the main key agents in increasing concrete strength, enhancing their seismic resistance.

Key words: crystal formation, bacterial suspension, concrete, strength enhancement, microorganisms.

QURILISH OBYEKTLARINING MEXANIK XUSUSIYATLARINI OSHIRISH UCHUN BOG'LOVCHI VOSITA SIFATIDA BAKTERIAL SUSPENZIYADA KRISTALL HOSIL BO'LISHI

Annotatsiya

Maqolada mikroorganizmlarning kristall hosil qilish qobiliyati orqali qurilish obyektlarning mexanik xususiyatlarining ortishi, mikroorganizmlarning kristall hosil qilishi, kristallarning sement eritmasida tarqalish mexanizmlari ko'rib chiqiladi. Olib borilgan ilmiy-tadqiqot natijalariga ko'ra, kristall hosil qiluvchi biomassa qo'shilgan beton an'anaviy betonlash usuliga qaraganda eng yaxshi natijani ko'rsatdi. Bakterial qo'shimchalar kalsit kristallarining hosil qilish qobiliyati beton mustahkamligini oshirishda va seysmik bardoshlilikini ta'minlashda asosiy omil sifatida xizmat qilganligi alohida ta'kidlab o'tildi.

Kalit so'zlar: kristall hosil bo'lishi, bakteriya suspenziyasi, beton, mustahkamlik, mikroorganizmlar.

Введение. В мире существуют различные виды микроорганизмов начиная от бактерии заканчивая грибов. Правильно выбранный вид микроорганизма, при совершении некой цели, может открыть невероятные открытия в

мире науки и инновации. Авторы данной статьи провели научно-исследовательские работы по повышению механических свойств бетона на сжатие. В сегодняшний день бетон является самым распространенным материалом на земле после воды [1]. Так как бетон набирает необходимую прочность во время процесса твердения [2]. Поэтому очень важно определять с высокой точностью значение прочности этого материала перед использованием изделий в строительстве. Для повышения прочности строительных объектов, в мире существуют различные технологии и вяжущие добавки, разрабатываемые продвинутыми учеными из разных отраслей науки и техники [3].

Литературный обзор. Применения разных наполнителей в отрасли строительства, а именно, железобетонных и цементобетонных конструкциях, являются одним из путей повышения его физико-механических характеристик и экономической эффективности [4]. Ряд бактерий, которые можно обнаружить в почве, песке и природных минералах, обладают способностью выделять карбонат кальция как в естественных, так и в лабораторных условиях. Гидролиз мочевины с помощью фермента уреазы является самым простым из всех механизмов осаждения выработанного микроорганизмами кальцита (MICP) [5]. Наиболее подходящим способом их получения является гидролиз мочевины, поскольку он сопровождается подщелачиванием окружающей среды. Исходя из этого можно сказать, что такие бактерии действуют как катализатор реакции гидролиза мочевины. Такими бактериями считаются уреазоактивные бактерии. Способность расщеплять мочевины широко распространена среди бактерий, обитающих в почвах и подземных системах [6].

Установлено, что в высокощелочной среде способны выживать штаммы бактерий рода *Bacillus*, которые обычно образуют споры в виде приспособленных к определенным условиям клеток, выдерживающих высокие напряжения, спровоцированные механическими и химическими факторами. Кроме того, эти споры проявляют низкую активность метаболического обмена и имеют чрезвычайно длительный жизненный цикл. Известны виды, споры которых жизнеспособны до 200 лет [7].

Бактериальные поверхности играют основную роль в осаждении кальция. При нейтральном значении pH благодаря наличию нескольких отрицательно заряженных групп положительно заряженные ионы металлов могут прикрепляться к поверхности бактерий, способствуя гетерогенному процессу зародышеобразования [8]. Как правило, карбонатные осадки развиваются на внешней поверхности бактериальных клеток с последующим отслоением [9], поэтому бактерии могут быть встроены в растущие кристаллы карбоната.

Таким образом, большинство представляющих интерес бактериальных агентов, предположительно должны быть аэробными спорообразующими бактериями рода *Bacillus*. Из ранее опубликованных литературных данных следует, что в костных материалах чаще всего использовали утилизирующие мочевины бактерии видов *S. pasteurii*. Исходя из этого можно сделать вывод, что выбор микроорганизмов играет первостепенную роль в повышении эффективности при восстановлении твердых материалов [10].

Методология исследований. Исследовательской группой института ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А.Арифова при Академии наук Республики Узбекистан для исследования данной работы выбран бактерии родом *S. pasteurii*, *S. ureae* и *B. thuringiensis*. После выделения бактерии из соответствующих источников, а именно из цемента и песка, выполнен этап выделения культуральных клеток на питательные агаризованные среды. Для этого культуры выращивали на жидкой питательной среде, состоящей из 8 г/л питательного бульона (5 г/л пептона и 3 г/л экстракта мяса) при pH 7. В каждую питательную среду добавляли 10 г/л $MnSO_4 \cdot H_2O$ для усиления спорообразования выращиваемых культур. Все жидкие питательные среды стерилизовали в автоклаве в течение 20 мин при 120 °C при давлении 1,0 атм. С целью определения перспективного вида микроорганизмов имеющиеся способность производить кристаллы кальцита осуществлено суспендирование естественных образцов бактериальных клеток в стерильном физиологическом растворе (9 г/л NaCl). При этом раствор было разбавлено соответствующим образом и высеяно на агар, содержащий 3 г/л питательного бульона, 20 г/л мочевины, 2,12 г/л $NaHCO_3$, 10 г/л NH_4Cl . Образование кристаллов наблюдали на 7-й и 14-й день. На рис.1 показан результат образовавшихся кристаллов после улетучивания физиологического раствора (9 г/л NaCl).

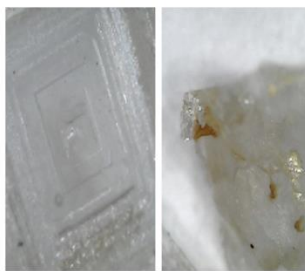


Рис.1 Образовавшиеся кристаллы кальцита после улетучивания NaCl

В итоге было определено, что явные кристаллы были образованы из культуральных клеток бактерии рода *Sporosarcina*.

Анализ и результаты. Авторы донной статьи измерили бетонный состав традиционного цементирования и сравнили с разрушающим методом контроля, а именно на гидравлическом прессе. Установлено, что традиционный способ цементирования бетонных изделий выдерживают 5 тонн 620 кг при сжатии на гидравлическом прессе, после чего настоящие авторы пришли к выводу усовершенствования прочности бетонных изделий безвредным и мало затратным методом. Данным направлением был выбран биологический способ упрочнения бетонных конструкций, а именно бактериологическим способом повышения качества цементирования.

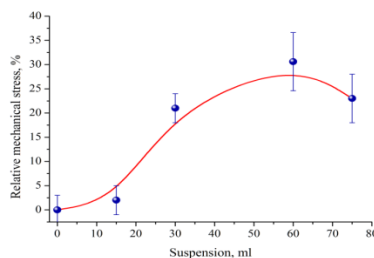


Рис.2 Относительное механическое прессование бетонных образцов

Количество жизнеспособных микроорганизмов определяли путем посева разбавленной взвеси клеток на пластину с питательным агаром и мочевиной. Количество термостойких спор рассчитывали путем посева после нагревания при 65 °С в течение 15 и 45 мин. На основе данных, установлено, что биологический способ повышения цементирования бетонных изделий выдерживают 8 тонн 900 кг.

Таким образом, было определено, что из всех семейств бактерии именно *Sporosarcina* выражает свою способность выработки осадка кальция карбоната путем явного проявления образования кристаллов. Данные кристаллы являются подтверждающим агентом для повышения механических свойств строительных объектов, а именно бетона, что и обуславливается выдерживанием силы на сжатие на 8 тонн 900 кг. В дальнейшем, можно рассматривать и другие виды бактерий, способные образовать кристаллы кальцита с последующим образованием осадка кальция карбоната с целью разработки бактериальной суспензии на существующих трещин.

Заключение и предложения: Новейшая разработка по повышению прочности строительных объектов на основе кристаллообразующих бактерий, безусловно увеличит срок годности строительных объектов. Предотвращать образование трещин путем применения данной бактериальной суспензии при стройке фундаментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Betts M. Global Construction Perspectives (Firm); Oxford Economics (Firm) A global forecast for the construction industry over the next decade to 2020 // Global construction 2030. 2018
2. Копылов В.А. Лечение открытых переломов конечностей с использованием метаболитов *bacillus subtilis* 804, содержащих фактор роста фибробластов/ Диссертация на соискание ученой степени доктора медицинских наук. Оренбург – 2017
3. <https://gcesp.ru/blog/opredelenie-prochnosti-betona>.
4. Морозов Н.М., Боровских И.В. Влияние метакаолина на свойства цементных систем // Известия КазГАСУ. 2015. №3 (33)
5. Li X. Y. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge / X. Y. Li, S. F. Yang // Water Research. – 2007. – Vol. 41 (5) – P. 1022–1030
6. Montgomery R. A. Multi-purpose canister storage unit and transfer cask thermal analysis / R. A. Montgomery, K. A. Niemer, C. N. Lindner // American Society of Mechanical Engineers, Heat Transfer Division, (Publication) HTD. – 1997. – 350. – P. 45–54
7. Работнов Ю. Н. Введение в механику разрушения / Ю. Н. Работнов. 2-е изд. – М. : Либроком, 2009. – 82 с
8. Jonkers H. M. At two component bacteria based self-healing concrete / H. M. Jonkers // Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II. – 2009. – № 3. – P. 215–220
9. Мартусевич А.К., Зимин Ю.В. Роль физико-химических процессов в системе «микроорганизм - человек» // Вестник Санкт-Петербургской государственной медицинской академии им. И.И. Мечникова. 2008. №3
10. Turakhodjaeva F., Methods to Improve the Mechanical Properties of Biomass//Processing and Fabrication of Advanced Materials –XXVII. Jonkoping, SWEDEN, 27-29 may 2019, pp.396-403



Фарход ТУРГУНБАЕВ,

Доцент Национальный университет Узбекистана, PhD

E-mail: integral-1984@mail.ru

Камил ТУРСУНМЕТОВ,

Профессор Национальный университет Узбекистана, ф-м.ф.д

E-mail: kamiljan47@yandex.ru

Рецензент академик АН РУз Г. Мамадолимова

SENSITIVITY OF NIGHT FLYING INSECTS TO THE SPECTRUM OF LIGHT RAYS

Annotation

Nocturnal flying insects such as moths and beetles are very sensitive to artificial light sources. In recent years, the widespread use of artificial lighting has led to an increase in light pollution, which has a detrimental effect on the behavior and survival of these insects. One important aspect of light pollution is the spectrum of light emitted by artificial light sources. In this review, we analyze the sensitivity of nocturnal flying insects to different wavelengths of light and how this affects their behavior and ecology, as well as the preliminary results of our experiments.

Key words: Light, spectrum, insect, sensitivity, wavelength, ecology, navigation

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ НОЧНЫХ ЛЕТАЮЩИХ НАСЕКОМЫХ К СПЕКТРУ СВЕТОВЫХ ЛУЧЕЙ

Аннотация

Ночные летающие насекомые, такие как мотыльки и жуки, очень чувствительны к искусственным источникам света. В последние годы широкое использование искусственного освещения привело к увеличению светового загрязнения, что оказывает пагубное влияние на поведение и выживание этих насекомых. Одним из важных аспектов светового загрязнения является спектр света, излучаемого искусственными источниками света. В этом обзоре мы анализируем чувствительность ночных летающих насекомых к различным длинам волн света и как это влияет на их поведение и экологию, а также предварительные результаты наших экспериментов.

Ключевые слова: Свет, спектр, насекомое, чувствительность, длина волны, экология, навигация.

YORUG'LIK NURLARI SPEKTRIGA KECHA UCHADIGAN HASHAROTLARNING SEZGIRLIGI

Annotatsiya

Kuya va qo'ng'iz kabi tungi uchuvchi hasharotlar sun'iy yorug'lik manbalariga juda sezgir. So'nggi yillarda sun'iy yoritishning keng qo'llanilishi yorug'likdan ifloslanishning kuchayishiga olib keldi, bu esa bu hasharotlarning hatti-harakati va omon qolishiga salbiy ta'sir ko'rsatmoqda. Yorug'lik dan ifloslanishning muhim jihatlaridan biri bu sun'iy yorug'lik manbalari tomonidan chiqariladigan yorug'lik spektridir. Ushbu sharhda biz tungi uchuvchi hasharotlarning yorug'likning turli to'lqin uzunliklariga nisbatan sezgirlikini va bu ularning hatti-harakatlari va ekologiyasiga qanday ta'sir qilishini, shuningdek, tajribalarimizdan olingan dastlabki natijalarni tahlil qilamiz.

Kalit so'zlar: Yorug'lik, spektr, hasharot, sezgirlik, to'lqin uzunlik, ekologiya, navigatsiya.

Введение. Свет является решающим фактором выживания и поведения многих живых организмов. Регулирует циркадные ритмы, размножение и миграцию животных. Однако искусственный свет ночью (ALAN) все больше становится глобальным явлением и вызывает широко распространенные экологические последствия. Одним из наиболее значительных эффектов ALAN является его воздействие на ночных летающих насекомых. Эти насекомые, такие как мотыльки, жуки и мухи, притягиваются к искусственному свету, который часто приводит к их смерти. Чувствительность ночных летающих насекомых к спектру световых лучей является критическим фактором при определении их притяжения к источникам света. В этой публикации мы рассмотрим существующую литературу по чувствительности ночных летающих насекомых к спектру световых лучей.

Экологические воздействия искусственного света ночью: Экологическое воздействие ALAN огромно и разнообразно. Он влияет на различные аспекты функционирования экосистем, включая поведение организмов, структуру и состав сообществ, а также поток энергии через пищевые сети. Известно, что ALAN влияет на поведение ночных летающих насекомых, таких как их кормление, спаривание и навигация. Например, исследование van Langevelde et al. (2011) обнаружил, что спектральный состав искусственного света влияет на притяжение моли. Исследование показало, что мотыльки были более привлечены к источникам света с более высокой долей синей и зеленой длин волн, чем к источникам света с более высокой долей красной и желтой длин волн. Привлечение моли к источникам света влияет на отношения хищник-жертва в экосистемах. Хищники, которые питаются ночными летающими насекомыми, такими как летучие мыши и птицы, могут испытывать снижение доступности пищи из-за сокращения числа насекомых.

Чувствительность ночных летающих насекомых к спектру световых лучей: Чувствительность ночных летающих насекомых к спектру световых лучей является критическим фактором при определении их притяжения к источникам света. Спектральная чувствительность организма определяется фоторецепторами в его глазах. У насекомых фоторецепторы состоят из трех типов омматидий, каждый из которых содержит свой визуальный пигмент, чувствительный к определенному диапазону длин волн. Чувствительность ночных летающих насекомых к разным длинам волн света варьируется в зависимости от вида.

Чувствительность к красному свету: Ночные насекомые, как правило, менее чувствительны к красному свету по сравнению с другими длинами волн света. Это связано с тем, что большинство ночных насекомых не могут воспринимать красный свет из-за отсутствия в их глазах чувствительных к красному фоторецепторов. Тем не менее, было обнаружено, что некоторые виды, такие как мотылек капустного петли, привлекают красный свет, что позволяет предположить, что они могут обладать некоторыми чувствительными к красному свету фоторецепторами.

Чувствительность к синему и ультрафиолетовому свету: Синий и ультрафиолетовый свет (UV) очень привлекателен для многих ночных насекомых. Это связано с тем, что эти длины волн света аналогичны длинам волн света, излучаемого луной и звездами, которые насекомые используют для навигации. Многие виды моли и жуков привлекают источники света, которые излучают синий или ультрафиолетовый свет, что может помешать их навигации и привести к дезориентации.

Чувствительность к зеленому свету: Было обнаружено, что зеленый свет оказывает различное влияние на различные виды ночных насекомых. Было обнаружено, что некоторые виды, такие как перцовый мотылек, сильно привлекают зеленый свет. Однако было обнаружено, что другие виды, такие как алмазная моль, менее чувствительны к зеленому свету. Чувствительность к желтому свету: Было обнаружено, что желтый свет очень привлекателен для некоторых видов ночных насекомых, таких как мотылек кукурузного червя. Это связано с тем, что желтый свет похож на длины волн света, излучаемого цветами, которые насекомые используют для обнаружения источников нектара. Однако было обнаружено, что другие виды, такие как табачный бурый мотылек, менее чувствительны к желтому свету.

Вывод. Чувствительность ночных летающих насекомых к разным длинам волн света является важным фактором, который следует учитывать при разработке систем искусственного освещения. Синий и ультрафиолетовый свет очень привлекательны для многих видов ночных насекомых, и их использование следует минимизировать или избегать в системах наружного освещения. Красный свет, как правило, менее привлекателен для ночных насекомых, хотя некоторые виды могут быть привлечены к нему. Зеленый и желтый свет оказывают различное влияние на различные виды ночных насекомых, и их использование должно быть тщательно рассмотрено в зависимости от целевых видов и экологического контекста. В целом, уменьшение негативного воздействия светового загрязнения на ночных летающих насекомых потребует более глубокого понимания их чувствительности к различным длинам волн света и разработки систем освещения, которые минимизируют нарушение их поведения и экология.

Экспериментальная часть. Наши исследования направлены на устранение ночных вредителей в сельском хозяйстве. Зависимость чувствительности ночных насекомых от спектра светового излучения проверялась несколькими способами с помощью разработанного нами прибора в полевых условиях, в результате чего светочувствительность ночных насекомых различается в зависимости от спектра светового излучения. Было обнаружено, что чувствительность к желтому свету выше, чем к белому свету.





Устройство работает на возобновляемых источниках электроэнергии и может быть полностью заряжено за 10-15 дней. Устройство работает только ночью, принцип работы основан на автоматическом режиме. За одну ночь выпало 4-5 штук разных видов бабочек, показанных на картинке. Опыжается, что достаточно установить 1-2 устройства на открытых площадках 400-500 кв. М.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гастон К.Дж., Бенни Дж., Дэвис Т.В., Хопкинс Дж. Экологические последствия ночного светового загрязнения: механистическая оценка. Биологические обзоры. 2013; 88 (4): 912-927.
2. van Langevelde F, Ettema JA, Donners M, WallisDeVries MF, Groenendijk D, Wijnands JW и др. Влияние спектрального состава искусственного света на притяжение моли. Биологическая консервация. 2011; 144 (9): 2274-2281.
3. Longcore T., Rich C. Экологическое световое загрязнение. Границы в экологии и окружающей среде. 2004; 2 (4): 191-198.
4. Riley JR, Reynolds DR, Smith AD. Эффективность легких ловушек для отбора проб моли. Журнал прикладной экологии. 1983; 20 (1): 31-40.
5. Ингер Р., Бенни Дж., Дэвис Т.В., Гастон К.Дж. Потенциальные биологические и экологические эффекты мерцающего искусственного света. PLOS ONE. 2014; 9 (5): e98631.
6. Фрэнк К.Д. Влияние наружного освещения на мотыльков: оценка. Журнал Общества чешуекрылых. 1988; 42 (2): 63-93.
6. Рунд SSC, Ли С.Дж., Буш БР, Даффилд Дж. Электрик. Различия в ежедневной активности полета и циркадных часах комаров *Anopheles gambiae*. Журнал физиологии насекомых. 2012; 58 (12): 1609-1619.
7. Özgökçe MS, Keleş S. Спектральная чувствительность трех видов ноктуидных моли к ультрафиолетовому, фиолетовому и зеленому свету. Журнал науки о насекомых. 2015; 15 (1): 100.
8. Green ER, Перри М.Дж. Цвет и поведение моли: полевое исследование с использованием дистанционно управляемой фотографии. Журнал экспериментальной биологии. 2016; 219 (23): 3727-3736.
9. Менакер М., Эскин А. Циркадные ритмы в поведении насекомых. Ежегодный обзор энтомологии. 1966; 11 (1): 141-158.
10. Turgunboyev F, Tursunmetov K. A. Dependence of the electrical property of soil on its moisture 2020. Agroilm, Tashkent. p: 64-65 №3.



Vakhid KHAMIDOV,

Republican scientific and methodological center for the
development of education of the Republic of Uzbekistan,
Department of Astronomy and Astrophysics, National University of Uzbekistan

INFLUENCE OF PLASMA ON DEFLECTION ANGLE BY A SCHWARZSCHILD BLACK HOLE IN PERFECT FLUID DARK MATTER

Annotation

We have studied the influence of uniform and non-uniform distributed plasma on gravitational weak lensing around a black hole in the presence of perfect fluid dark matter (PFDM). We have represented that the PFDM and plasma parameter has opposite effect on the change of the value of the deflection angle of the light rays in a weak field regime.

Introduction. One of the first fundamental signatures of the general relativity (GR) since its discovery by Einstein in 1916 is the influence of the observables black hole shadow and gravitational lensing (in strong and weak field regime). The effect is based on the light ray deflection near the gravitating object due to space-time curvature. The classical gravitational lensing in general relativity has been described in reviews with detail [1]. At the same time it is important to consider the photon motion (light rays) in curved space-time since it is relevant for further study of gravitational lensing. Moreover, the plasma medium around compact object may interact with the electromagnetic wave and consequently influence on trajectory of light rays. Particularly, in Refs. [2-11] scientists have studied the photon motion in different space-times metric and some of them devoted to investigate the effect of plasma together with gravity on photon motion. In addition, one of the hot topic is strong gravitational lensing in a vacuum; recently, the theoretical analysis of strong lensing is studied by several authors for various space-time geometries in Refs. [12-14].

There is some evidence for the existence of dark matter or dark energy, and according to the standard cosmological model [15] our Universe mainly contains 68% dark energy, about 27% dark matter and 5% baryonic matter [15]. Dark matter is nonbaryonic matter. Consequently one may ask the question whether dark energy or dark matter affect the astrophysical processes in the vicinity of compact objects. It is true that dark matter is invisible, so it is difficult to test it, but we can feel the effect of dark matter or dark energy from observations. From this point on, dark matter is extremely important for studying the properties of the physics of a black hole. It is well known that dark matter or dark energy also exists around a black hole, so their contribution is always very important and interesting, when we study the motion of particles around a black hole in the Universe. In the latest decay, a black hole surrounded by the quintessence of dark energy is examined in more detail [16]. Further properties of the spacetime around the black hole surrounded by quintessence have been explored in Refs. [17,18]. Alternative model for dark matter has been also proposed in [16] where quintessence scalar field is considered as PFDM. The solution of black hole surrounded by PFDM contains the logarithmic term $\lambda \ln(r/|\lambda|)$ appearing in the metric functions, corresponding to the nonvanishing contribution of dark matter through parameter λ . Following the idea that dark matter halo is formed by weakly interacting massive particles in Ref. [19], it has been derived a similar black hole solution involving a logarithmic term. The properties of the spacetime around the black hole surrounded by PFDM have been investigated in [20].

The main motivation of the study performed in this paper is to test the PFDM model for dark matter using the photon motion around compact object in the presence of plasma medium. Observable properties of the light deflection angle due to gravitational lensing may help to get constraints on model and theory describing the dark matter around compact object. Consequently this will help us to explain the nature of the dark matter and the astrophysical processes related to the effects of dark matter. Particularly, in this paper we have considered the photon motion around black hole surrounded by PFDM. Performing the analysis of the effects of PFDM on light deflection we have found out that the presence of PFDM causes decrease the light deflection. This may be interpreted as negative gravitational effect of PFDM on photons since PFDM is surrounding the central object and photons. The gravitational effects on photons of PFDM and central object are opposite to each other.

Weak lensing in the presence of plasma. The metric describing a static and spherically symmetric black hole immersed in perfect fluid dark matter in Schwarzschild coordinates (t, r, θ, φ) is given by [19]

$$ds^2 = -f(r)dt^2 + f(r)^{-1}dr^2 + r^2d\Omega^2 \quad (1)$$

With

$$f(r) = 1 - \frac{2M}{r} + \frac{\lambda}{r} \ln \frac{r}{|\lambda|} \quad (2)$$

where M is the mass of the black hole and parameter λ is associated with the density and the pressure of dark matter [19]. We will consider a weak-field regime approximation defined as shown below:

$$g_{\alpha\beta} = \eta_{\alpha\beta} + h_{\alpha\beta} \quad (3)$$

where $\eta_{\alpha\beta}$ is expression for the flat geometry and $h_{\alpha\beta}$ is a perturbation of the flat spacetime geometry with the following general properties [5]:

$$\begin{aligned} \eta_{\alpha\beta} &= \text{diag}(-1, 1, 1, 1), \\ h_{\alpha\beta} &\ll 1, \quad h_{\alpha\beta} \rightarrow 0 \text{ under } x^i \rightarrow \infty \\ g^{\alpha\beta} &= \eta^{\alpha\beta} - h^{\alpha\beta}, \quad h^{\alpha\beta} = h_{\alpha\beta} \end{aligned} \tag{4}$$

Here we study the effect of the plasma on the gravitational deflection angle in the presence of the PFDM in the Schwarzschild spacetime geometry. Consider the basic expression for the deflection angle in the presence of a plasma medium as [5,8]

$$\hat{\alpha}_k = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \left(h_{33} + \frac{h_{00}\omega^2 - K_e N(x^i)}{\omega^2 - \omega_e^2} \right)_k dz, \tag{5}$$

where $N(x^i)$ is the concentration of charged particles in plasma, ω and ω_e are photon and plasma frequencies, respectively. $K_e = 4\pi e^2/m_e$ is constant value of plasma particle. On the other hand, one may rewrite Eq. (5) in the different form as [5]:

$$\hat{\alpha}_b = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{b}{r} \left(\frac{dh_{33}}{dr} + \frac{1}{1 - \omega_e^2/\omega^2} \frac{dh_{00}}{dr} - \frac{K_e}{\omega^2 - \omega_e^2} \frac{dN}{dr} \right) dz. \tag{6}$$

The value $\hat{\alpha}_b$ can be both negative (towards from the compact object) and positive (away from the compact object). In the weak field regime at large distances r from the compact object surrounded by PFDM the spacetime metric can be expressed as

$$ds^2 = ds_0^2 + \left(\frac{R_s}{r} - \frac{\lambda}{r} \ln \frac{r}{|\lambda|} \right) dt^2 + \left(\frac{R_s}{r} - \frac{\lambda}{r} \ln \frac{r}{|\lambda|} \right) dr^2, \tag{7}$$

where $ds_0^2 = -dt^2 + dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$ is the line element in the flat spacetime and we have used notation $R_s = 2M$.

In order to calculate Eq. (6) one can rewrite the components $h_{\alpha\beta}$ in Cartesian coordinates in the form

$$\begin{aligned} h_{00} &= \left(\frac{R_s}{r} - \frac{\lambda}{r} \ln \frac{r}{|\lambda|} \right) \\ h_{ik} &= \left(\frac{R_s}{r} - \frac{\lambda}{r} \ln \frac{r}{|\lambda|} \right) n_i n_k \\ h_{33} &= \left(\frac{R_s}{r} - \frac{\lambda}{r} \ln \frac{r}{|\lambda|} \right) \cos^2\chi, \end{aligned} \tag{8}$$

where new notation $\cos^2\chi = z^2/(b^2 + z^2)$ and $r^2 = b^2 + z^2$ are introduced. One may easily calculate the derivative of h_{00} and h_{33} and get as

$$\begin{aligned} \frac{dh_{33}}{dr} &= -\frac{3z^2 R_s}{r^4} - \frac{\lambda z^2}{r^4} + \frac{3\lambda z^2 \ln\left(\frac{r}{|\lambda|}\right)}{r^4} \\ \frac{dh_{00}}{dr} &= -\frac{\lambda}{r^2} + \frac{\lambda \ln\left(\frac{r}{|\lambda|}\right)}{r^2} - \frac{R_s}{r^2}. \end{aligned} \tag{9}$$

Now one may decompose the expression for the deflection angle in the following form [8]:

$$\hat{\alpha}_b = \hat{\alpha}_1 + \hat{\alpha}_2 + \hat{\alpha}_3 \tag{10}$$

With

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_1 &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{b}{r} \frac{dh_{33}}{dr} dz, \\ \hat{\alpha}_2 &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{b}{r} \left(\frac{1}{1 - \omega_e^2/\omega^2} \frac{dh_{00}}{dr} \right) dz, \\ \hat{\alpha}_3 &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{b}{r} \left(-\frac{K_e}{\omega^2 - \omega_e^2} \frac{dN}{dr} \right) dz, \end{aligned} \tag{11}$$

where the new designations $\hat{\alpha}_1$, $\hat{\alpha}_2$ and $\hat{\alpha}_3$ correspond to contribution of deflection angle due to gravity, homogeneous and inhomogeneous plasma medium, respectively. Throughout the paper we will use Eq. (10) in order to study the effects of plasma medium on the deflection angle.

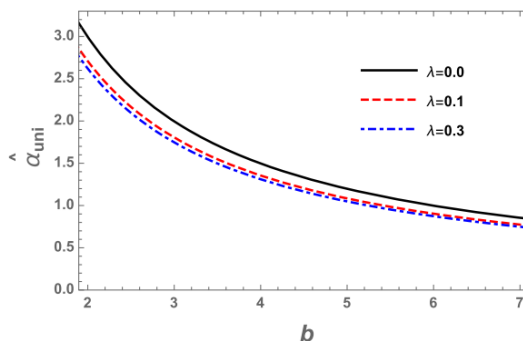


FIG. 1. The dependence of the deflection angle $\hat{\alpha}_{uni}$ on the impact parameter for different values of perfect fluid dark matter parameter λ (left panel) and plasma medium (right panel).

A. Uniform plasma effect to the deflection angle

In this subsection, we will study the deflection angle in the presence of a uniform plasma medium using Eq. (10), which can be rewritten as

$$\hat{\alpha}_{uni} = \hat{\alpha}_{uni1} + \hat{\alpha}_{uni2} + \hat{\alpha}_{uni3}, \tag{12}$$

where $\hat{\alpha}_{uni1}$ and $\hat{\alpha}_{uni2}$ can be interpreted as contribution to the deflection angle due to uniform plasma and $\hat{\alpha}_{uni3} = 0$ due to the uniform distribution of plasma. Using Eqs. (10), (9) and (12) one may easily obtain the deflection angle formula for photons around compact object surrounded by uniform plasma and PFDM as

$$\hat{\alpha}_{uni} = -\left(\frac{\lambda}{b} + \frac{\lambda \ln\left(\frac{r}{2\lambda}\right)}{b} - \frac{R_s}{b}\right) - \left(\frac{\lambda \ln\left[\frac{1}{2\lambda}\right]}{b} - \frac{R_s}{b}\right) \left(\frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega_e^2}\right). \tag{13}$$

Figure 1 shows the dependence of the deflection angle from the impact parameter of the photons for the different values of PFDM and plasma parameters. Figure 2 represents the dependence of the deflection angle from plasma and dark matter parameters for fixed values of impact parameter b . From Figs. 1 and 2 one may see that the deflection angle decreases with the increase of the PFDM parameter. On the other hand, the presence of plasma medium increase the gravitational deflection angle of photons. Note, that the deflection angle strive to zero with an increase of the impact parameter b .

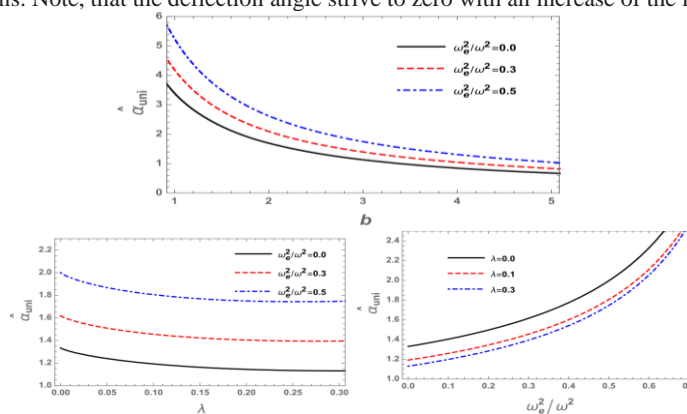


FIG. 2. The dependence of the deflection angle $\hat{\alpha}_{uni}$ on the perfect fluid dark matter parameter λ (left panel) and plasma medium (right panel) for the fixed value of impact parameter $b = 3M$.

B. Non-uniform plasma effect to the deflection angle

Now we explore the deflection angle of photons around compact object in the presence of nonuniform plasma and perfect fluid dark matter. Here we use the singular isothermal sphere (SIS) medium for the nonuniform plasma distribution [5]. The plasma concentration of SIS medium has the following form [5,8]

$$N(r) = \frac{\rho(r)}{km_p} \tag{14}$$

and

$$\rho(r) = \frac{\sigma_v^2}{2\pi r^2}, \tag{15}$$

where σ_v is the dispersion velocity and $\rho(r)$ is the plasma density. Now Eq. (10) can be decomposed as

$$\hat{\alpha}_{SIS} = \hat{\alpha}_{SIS1} + \hat{\alpha}_{SIS2} + \hat{\alpha}_{SIS3}, \tag{16}$$

where $\hat{\alpha}_{SIS1}$ and $\hat{\alpha}_{SIS2}$ correspond to the contribution to the deflection angle due to pure gravity and plasma effects and $\hat{\alpha}_{SIS3}$ corresponds to the contribution due to gradient of the density of the plasma medium. Using Eqs. (10), (9) and (16) one may easily obtain the deflection angle of photons around Schwarzschild black hole surrounded by nonuniform plasma in presence of PFDM in the following form:

$$\hat{\alpha}_{SIS} = -\frac{\lambda \omega_c^2 \ln\left(\frac{1}{2\lambda}\right) R_s^2}{\pi b^2 \omega^2} + \frac{\omega_c^2 R_s^2}{\pi b^2 \omega^2} + \frac{\omega_c^2 R_s^2}{2b^2 \omega^2} - \frac{\lambda}{b} + \frac{2\lambda \ln\left(\frac{1}{2\lambda}\right)}{b} + \frac{2R_s}{b}, \tag{17}$$

where we introduced new expression as

$$\omega_c^2 = \frac{\sigma_v^2 K_e}{2km_p R_s^2}. \tag{18}$$

Figure 3 shows the influence of dark matter parameter and nonuniform plasma medium on the deflection angle of photons around gravitation object. Figure 4 shows the dependence of the deflection angle on plasma and ark matter parameter λ for the fixed values of impact parameter and nonuniform plasma case. From Figs. 3 and 4 one may see that the deflection angle is decreasing in the presence of PFDM parameter. Moreover, similarly to the case of uniform plasma case, due to the effect of nonuniform plasma medium the deflection angle increases. Now we make comparison the deflection angle for the photons around Schwarzschild black hole in the presence of perfect fluid dark matter for the cases uniform and nonuniform

plasma medium. Figure 5 shows the difference of the deflection angle for the cases of uniform and nonuniform plasma medium. From this dependence one may easily speculate that the deflection angle of photon beam around black hole increases. From Fig. 5 one can easily compare both cases: the deflection angle is greater in a homogeneous case than an inhomogeneous plasma medium for the fixed value of impact parameter. Moreover, one can also see that with an increase of the PFDM parameter for uniform and nonuniform cases, the orbit of the photon comes closer to the central compact object. The decrease of the deflection angle with the increase of PFDM parameter for the fixed values of impact parameter can be interpreted as the negative effect of dark matter. Since the dark matter is distributed in the space around black hole the gravitational effect of PFDM on light rays from the outside of the photon trajectory has opposite effect with respect to the effect caused by central object. Thus gravity of the central object increases the deflection while PFDM causes to decrease the deflection angle of light rays.

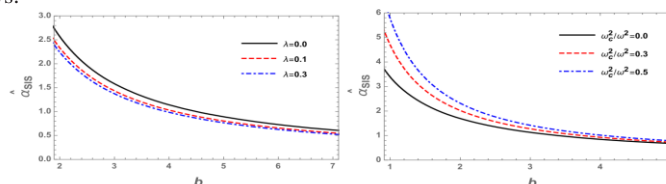


FIG. 3. The dependence of the deflection angle $\hat{\alpha}_{SIS}$ on the impact parameter for the different values of PFDM parameter λ (left panel) and plasma medium (right panel).

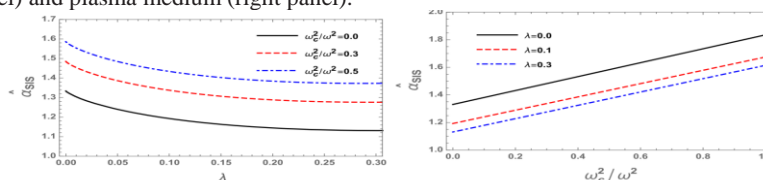


FIG. 4. The dependence of the deflection angle $\hat{\alpha}_{SIS}$ on the perfect fluid dark matter parameter λ (left panel) and plasma medium (right panel) for the fixed value of impact parameter $b = 3M$

Conclusions. In the present paper, the influence of plasma on weak gravitational lensing has been studied for the Schwarzschild black hole in the presence of perfect fluid dark matter (PFDM). Observable parameter such as the deflection angle is important for the gravitational lensing in general relativity. We have explored two cases: uniform nonuniform distributed plasma. Finally, the main results of the paper can be summarized as follows:

- (i) The analysis showed that the deflection angle decreases with the increase of the PFDM parameter. At the same time the presence of plasma medium increase the gravitational deflection angle of photons.
- (ii) We have obtained that the increase of parameter of nonuniform plasma medium causes the increase of deflection angle.
- (iii) The comparison of the deflection angle for the photons around black hole in the presence of perfect fluid dark matter in the cases of uniform and non-uniform distributed plasma showed that the deflection angle is greater in a homogeneous case with compare to one in inhomogeneous plasma medium.

REFERENCES

1. P. Schneider, J. Ehlers, and E. E. Falco, Gravitational Lenses, XIV (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg; New York, 1999), p. 560. Also Astronomy and Astrophysics Library (1999)
2. Rogers, Mon. Not. R. Astron. Soc. 451, 17 (2015).
3. X. Er and A. Rogers, Mon. Not. R. Astron. Soc. 475, 867 (2018).
4. Broderick and R. Blandford, Mon. Not. R. Astron. Soc. 342, 1280 (2003).
5. G. S. Bisnovaty-Kogan and O. Y. Tsupko, Mon. Not. R. Astron. Soc. 404, 1790 (2010).
6. V. S. Morozova, B. J. Ahmedov, and A. A. Tursunov, Astrophys. Space Sci. 346, 513 (2013).
7. Hakimov and F. Atamurotov, Astrophys. Space Sci. 361, 112 (2016).
8. F. Atamurotov, A. Abdujabbarov, and J. Rayimbaev, Eur. Phys. J. C 81, 118 (2021).
9. G. Z. Babar, F. Atamurotov, and A. Z. Babar, Phys. Dark Universe 32, 100798 (2021).
10. G. Z. Babar, F. Atamurotov, S. Ul Islam, and S. G. Ghosh, Phys. Rev. D 103, 084057 (2021).
11. F. Atamurotov, S. Shaymatov, P. Sheoran, and S. Siwach, J. Cosmol. Astropart. Phys. 08 (2021) 045.
12. K. S. Virbhadra and G. F. R. Ellis, Phys. Rev. D 62, 084003 (2000).
13. V. Bozza, Gen. Relativ. Gravit. 42, 2269 (2010).
14. S. Chakraborty and S. SenGupta, J. Cosmol. Astropart. Phys. 07 (2017)
15. Planck Collaboration, Astron. Astrophys. 594, A13 (2016).
16. V. V. Kiselev, Classical Quantum Gravity 20, 1187 (2003).
17. Benavides-Gallego, A. Abdujabbarov, and C. Bambi, Phys. Rev. D 101, 044038 (2020).
18. S. G. Ghosh, Eur. Phys. J. C 76, 222 (2016).
19. M.-H. Li and K.-C. Yang, Phys. Rev. D 86, 123015 (2012).
20. S. Haroon, M. Jamil, K. Jusufi, K. Lin, and R. B. Mann, Phys. Rev. D 99, 044015 (2019).



UDK: 530.1(075.8)

Khurshed KHAMRAKULOV,
Yadro Fizikasi Instituti O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi
E-mail: khamrakulov-khurshed@rambler.ru

Fizika-Texnika Instituti O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi, professor, fizika-matematika fanlari doktori A. S. Saidov taqrizi asosida

QUASI-STATIONARY MOTION IN A WEAK GRAVITATIONAL FIELD

Annotation

The stationary states of a particle in a weak gravitational field are considered in the linear approximation. The behavior of the wave function of a particle changes with an increase in the orbital quantum number l .

Key words: Schrödinger equation, Schwarzschild metric, gravity.

KUCHSIZ TORTISHISH MAYDONIDAGI ZARRACHANING KVAZISTATSIONAR HARAKATI

Annotatsiya

Kuchsiz tortishish maydonidagi zarrachaning statsionar holatlari ko'rib chiqiladi. Orbital kvant soni l ortishi bilan zarrachaning to'lqin funksiyasining harakati o'zgaradi.

Kalit so'zlar: Shryodinger tenglama, Schwarzschild metrikasi, gravitatsiya.

КВАЗИСТАЦИОНАРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦЫ В СЛАБОМ ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

Аннотация

В линейном приближении рассмотрены стационарные состояния частицы в слабом гравитационном поле. Показано, что характер поведения волновой функции частицы меняется с увеличением орбитального квантового числа l .

Ключевые слова: Уравнение Шрёдингера, метрика Шварцшильда, гравитация.

Введение. В работе [1] рассмотрено несколько пар независимых решений радиального уравнения соответствующего массивному полю Клейна-Гордона для пространственно-временной метрики Шварцшильда. Элизольд в работе [1] использовал рекуррентные соотношения из комплексных коэффициентов, которые включают большие порядки, чтобы получить приближённо радиальные решения. В работе [2] Элизольд использовал альтернативное расширение в обрезанной форме, чтобы получить приближённо полное решение. Смайт в работе [3] применил приближённый метод ВКБ для уравнения Клейна-Гордона с использованием метрики Шварцшильда. В результате было показано, что уравнение Клейна-Гордона записанное через пространственно-временную метрику Шварцшильда предсказывает обычное смещение перигелия. Роуэн и Стефенсон [4] применили разделение переменных и рассмотрели асимптотические решения после наложения некоторых ограничений, чтобы упростить уравнения. Существуют работы сфокусированные на решениях вблизи чёрных дыр. Например, в работе [5] рассмотрен возможный механизм всплеска гамма лучей от взрыва чёрных дыр. В работе [6] было рассмотрено влияние гравитационного поля порождённого с помощью заряженной и вращающейся чёрной дыры на заряжённое массивное скалярное поле. Далее, авторы рассмотрели излучение Хокинга заряжённых массивных скалярных частиц. Цель настоящей работы рассмотреть приближённый характер поведения волновой функции квантово-механической частицы в слабом гравитационном поле.

Пространственно-временная метрика Шварцшильда имеет вид

$$ds^2 = g_{00}c^2dt^2 + g_{11}dr^2 - r^2d\theta^2 - r^2\sin^2\theta d\varphi^2, \quad (1)$$

где

$$g_{00} = 1 - \frac{r_g}{r}, \quad g_{11} = -\frac{1}{1-r_g/r}, \quad (2)$$

$r_g = \frac{2GM}{c^2}$ – гравитационный радиус, G – гравитационная постоянная, M – масса центрального тела.

Для рассмотрения квантово-механических состояний частицы во внешнем поле $U(r)$ выберем простую модель состоящую из уравнения Шрёдингера. Уравнение Шрёдингера в ковариантной форме можно записать в виде [7]:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} g^{ij} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^i \partial x^j} - \Gamma_{ij}^k \frac{\partial \psi}{\partial x^k} \right) + U(r)\psi = 0, \quad (3)$$

где m – масса частицы, \hbar – постоянная Планка, Γ_{ij}^k – символы Кристоффеля.

Используя пространственную часть метрики Шварцшильда перепишем уравнение (3) в виде:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{1}{g_{11}} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{r_g}{2r^2} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{2}{r g_{11}} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{l(l+1)}{r^2} \psi \right) + U(r)\psi, \quad (4)$$

где l – орбитальное квантовое число.

Будем искать решение уравнения (4), основываясь на методе разделения переменных. Представляя волновую функцию в виде произведения радиальной части на угловую:

$$\psi = \tau(t)R_l(r)Y_{lm}(\theta, \varphi). \tag{5}$$

и деля исходное уравнение на (5), получаем:

$$\frac{i\hbar}{\tau} \frac{d\tau}{dt} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left[\frac{1}{g_{11}R_l} \frac{d^2R_l}{dr^2} - \frac{r_g}{2r^2R_l} \frac{dR_l}{dr} + \frac{2}{r g_{11}R_l} \frac{dR_l}{dr} + \frac{l(l+1)}{r^2} \right] + U(r) = E,$$

где E – константа разделения.

Здесь, мы написали знак полной производной по r , поскольку функция R_l зависит только от одной переменной r .

Решение для $\tau(t) = c_{1,2}e^{\pm \frac{i}{\hbar}Et}$ тривиально и мы не будем его рассматривать далее. Нас будут интересовать стационарные состояния частицы. Поэтому, мы будем рассматривать радиальное уравнение

$$\frac{1}{g_{11}} \frac{d^2R_l}{dr^2} - \frac{r_g}{2r^2} \frac{dR_l}{dr} + \frac{2}{r g_{11}} \frac{dR_l}{dr} + \frac{l(l+1)}{r^2} R_l + \frac{2m}{\hbar^2} [E - U(r)]R_l = 0. \tag{6}$$

Уравнение (6) позволит предсказать характер поведения волновой функции во внешнем поле $U(r)$.

Анализ. Для анализа уравнения (6) выберем решение в следующем виде [8]:

$$R_l(r) = \frac{\sqrt{g_{11}}}{r} u_l(r). \tag{7}$$

Подставляя, в исходное уравнение, получим

$$-\frac{d^2u_l}{dr^2} - \frac{g'_{11}}{g_{11}} \frac{du_l}{dr} + \frac{r_g}{2r^2} g_{11} \frac{du_l}{dr} - \frac{1}{2} \frac{g''_{11}}{g_{11}} u_l + \frac{1}{4} \frac{g'^2_{11}}{g_{11}} u_l + \frac{r_g}{4r^2} g'_{11} u_l - \frac{r_g}{2r^3} g_{11} u_l - \frac{l(l+1)}{r^2} g_{11} u_l = \frac{2m}{\hbar^2} [E - U(r)]g_{11} u_l. \tag{8}$$

Внешнее поле $U(r)$ выберем в виде поля Шварцшильда, которое имеет вид [9]:

$$U(r) = mc^2 \left(\sqrt{1 - \frac{r_g}{r}} - 1 \right). \tag{9}$$

Производные от метрического тензора (2) есть

$$g'_{11} = \frac{r_g}{(r-r_g)^2}, \quad g''_{11} = -\frac{2r_g}{(r-r_g)^3}. \tag{10}$$

Для удобства дальнейших вычислений перейдем к безразмерным переменным: $\zeta = r/a$, где a – Боровский радиус, $\zeta_g = r_g/a$ – безразмерный гравитационный радиус, $\varepsilon = 2mEa^2/\hbar^2$ – безразмерная энергия, $\alpha = a/\lambda$, $\lambda = \hbar/mc$ – const.

Связь производных метрического тензора $g_{11}(r)$ с производными метрического тензора $g_{11}(\zeta)$ в новых переменных ζ определяется как

$$(g_{11})_r = \frac{(g_{11})_\zeta}{a}, \quad (g_{11})_{rr} = \frac{(g_{11})_{\zeta\zeta}}{a^2}. \tag{11}$$

В результате уравнение (8) можно записать в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} & -\frac{d^2u_l}{d\zeta^2} + \frac{\zeta_g}{2\zeta(\zeta - \zeta_g)} \frac{du_l}{d\zeta} - \frac{\zeta_g}{2\zeta(\zeta - \zeta_g)^2} u_l + \frac{l(l+1)}{\zeta(\zeta - \zeta_g)} u_l = \\ & -\frac{2mEa^2}{\hbar^2} \frac{\zeta}{\zeta - \zeta_g} u_l + 2 \left(\frac{mca}{\hbar} \right)^2 \left(\sqrt{1 - \frac{\zeta_g}{\zeta}} - 1 \right) u_l, \tag{12} \\ & -\frac{d^2u_l}{d\zeta^2} + \frac{\zeta_g}{2\zeta^2 \left(1 - \frac{\zeta_g}{\zeta}\right)} \frac{du_l}{d\zeta} - \frac{\zeta_g}{2\zeta^3 \left(1 - \frac{\zeta_g}{\zeta}\right)^2} u_l + \frac{l(l+1)}{\zeta^2 \left(1 - \frac{\zeta_g}{\zeta}\right)} u_l = \\ & -\frac{2mEa^2}{\hbar^2} \frac{1}{1 - \frac{\zeta_g}{\zeta}} u_l - \frac{\alpha^2 \zeta_g}{\zeta} u_l. \tag{13} \end{aligned}$$

Разложим (13) в ряд Тейлора до 2-го порядка малости:

$$\begin{aligned} & -\frac{d^2u_l}{d\zeta^2} + \frac{\zeta_g}{2\zeta^2} \left(1 + \frac{\zeta_g}{\zeta}\right) \frac{du_l}{d\zeta} - \frac{\zeta_g}{2\zeta^3} \left(1 + 2\frac{\zeta_g}{\zeta}\right) u_l + \frac{l(l+1)}{\zeta^2} \left(1 + \frac{\zeta_g}{\zeta}\right) u_l \\ & = -2\varepsilon \left(1 + \frac{\zeta_g}{\zeta}\right) u_l - \frac{\alpha^2 \zeta_g}{\zeta} u_l. \tag{14} \end{aligned}$$

Сохраняя в (14) множитель ζ_g до 1-го порядка малости получим

$$\frac{d^2u_l}{d\zeta^2} - \frac{\zeta_g}{2\zeta^2} \frac{du_l}{d\zeta} - \frac{l(l+1)}{\zeta^2} u_l - \zeta_g \left[\frac{l(l+1)}{\zeta^3} - \frac{1}{2\zeta^3} + \frac{\alpha^2}{\zeta} + \frac{2\varepsilon}{\zeta} \right] u_l = 2\varepsilon u_l. \tag{15}$$

Уравнение (15) относится к типу задач Штурма-Лиувилля. На рисунке 1 показано поведение волновой функции основного состояния в слабом гравитационном поле. Оно носит колебательный характер.

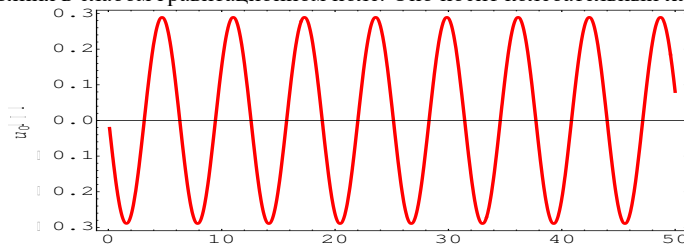


Рис. 1. Поведение волновой функции основного состояния частицы в слабом гравитационном поле. Параметр $\alpha = 0.1$ взят из работы [10]. Параметры $\zeta_g = 0.005$ и $\zeta_0 = 0.005$ взяты из работы [8].
 На рисунках 2 и 3 показаны поведения волновых функций возбуждённых состояний в слабом гравитационном поле.

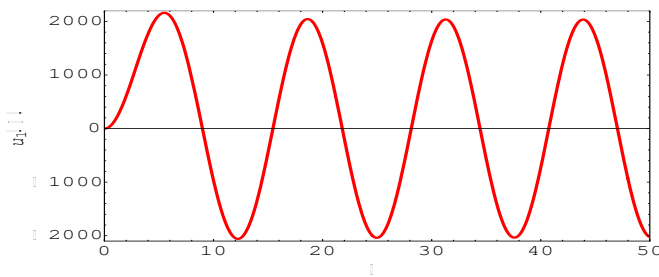


Рис. 2. Поведение волновой функции 1-го возбуждённого состояния с орбитальным квантовым числом $l = 1$.
 Остальные параметры такие же как и на рисунке 1.

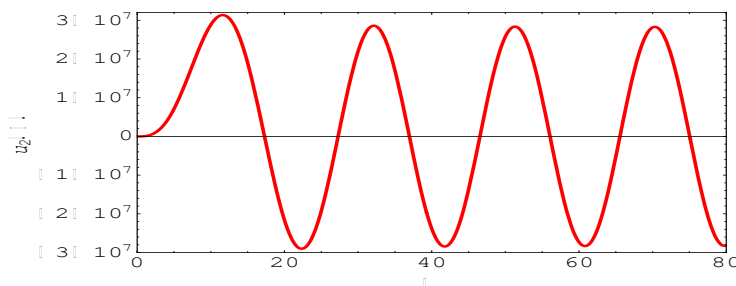


Рис. 3. Поведение волновой функции 2-го возбуждённого состояния с орбитальным квантовым числом $l = 2$.
 Остальные параметры такие же как и на рисунке 1.

Как видно из графиков амплитуды колебаний волновых функций с увеличением орбитального квантового числа l начинают сильно расти. Далее, при множителе ζ_g можно усреднить уравнение (15)

$$\frac{d^2 u_l}{d\zeta^2} - \frac{\zeta_g}{2} \left\langle \frac{1}{\zeta^2} \right\rangle \frac{du_l}{d\zeta} - \frac{l(l+1)}{\zeta^2} u_l - \zeta_g \left[l(l+1) \left\langle \frac{1}{\zeta^3} \right\rangle - \frac{1}{2} \left\langle \frac{1}{\zeta^3} \right\rangle + \alpha^2 \left\langle \frac{1}{\zeta} \right\rangle + 2\varepsilon \left(\left\langle \frac{1}{\zeta} \right\rangle + \frac{1}{\zeta_g} \right) \right] u_l = 0 \tag{16}$$

и воспользоваться результатами задачи об атоме водорода:

$$\left\langle \frac{1}{\zeta} \right\rangle = \frac{1}{n^2}, \quad \left\langle \frac{1}{\zeta^2} \right\rangle = \frac{1}{(l+\frac{1}{2})n^3}, \quad \left\langle \frac{1}{\zeta^3} \right\rangle = \frac{1}{l(l+\frac{1}{2})(l+1)n^3}, \quad \varepsilon_n = -\frac{1}{2n^2}. \tag{17}$$

Тогда уравнение (15) примет вид

$$\frac{d^2 u_l}{d\zeta^2} - \frac{\zeta_g}{(2l+1)n^3} \frac{du_l}{d\zeta} - \frac{l(l+1)}{\zeta^2} u_l - \zeta_g \left[\frac{1}{(l+\frac{1}{2})n^3} - \frac{1}{l(2l+1)(l+1)n^3} + \frac{1}{n^2} \left(\alpha^2 - \frac{1}{n^2} - \frac{1}{\zeta_g} \right) \right] u_l = 0. \tag{18}$$

Точное решение уравнения (18) имеет вид

$$u_l(\zeta) = C e^{\frac{\alpha\zeta}{2}} \sqrt{\zeta} J_m \left(-\frac{i}{2} \sqrt{a^2 + 4c} \zeta \right), \tag{19}$$

где

$$a = \frac{\zeta_g}{(2l+1)n^3}, \quad b = l(l+1),$$

$$c = \frac{1}{(l+\frac{1}{2})n^3} - \frac{1}{l(2l+1)(l+1)n^3} + \frac{1}{n^2} \left(\alpha^2 - \frac{1}{n^2} - \frac{1}{\zeta_g} \right),$$

$$m = \frac{1}{2} \sqrt{1 + 4b}.$$

На рисунке 4 показан приближённый характер поведения волновой функции в поле тяжести при усреднении уравнения (18) при множителе ζ_g . В данном случае поведение волновой функции имеет также колебательный характер.

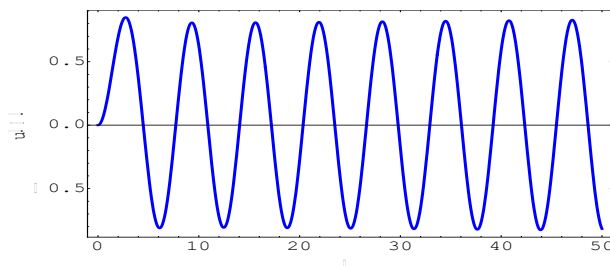


Рис. 4. Приближённый характер поведения волновой функции согласно уравнению (18) в слабом гравитационном поле.

Заключение. Во-первых, в линейном приближении численно получены стационарные состояния частицы в слабом гравитационном поле. Во-вторых, численно было показано, что характер поведения волновой функции частицы меняется с увеличением орбитального квантового числа l .

ЛИТЕРАТУРА

1. Elizalde E., Phys. Rev. D 36, 1269 (1987).
2. Elizalde E., Phys. Rev. D 37, 2127 (1988).
3. P. D. P. Smith, Phys. Lett. A 43, 144 (1973).
4. Rowan D. J., Stephenson G., Phys J.. A 9, 1631 (1976).
5. Qin Y. P., Sci. China Phys. Mech. Astron. 55, 381 (2012).
6. Vieira H. S., Bezerra V. B., Muniz C. R., Ann. Phys. 350, 14 (2014).
7. Флюгге. Задачи по квантовой механике. т. 1, 1971 г; Л. Д. Блохинцев. Квантовая механика. 5-е изд., 1976 г.
8. Lehn R. D., Chabysheva S. S., and Hiller J. R., Eur. Phys J.. 39, 045405 (2018).
9. Voracek P, Astrophys. Space Sci. 65, 397 (1979).
10. Chen Y., Liu Y., Ru-Sen Lu., Mizuno Y, Shu J., Xue X., Yuan Q., Zhao Y., Nat. Astron. 6, 592 (2022).



UDK:541.64:53

Jaxongir XAQQULOV,

O'zbekiston Milliy universiteti fizika-matematika fanlari

bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Email: jmkhakkulov@mail.ru

Umar ABDURAHMONOV,

O'zbekiston Milliy universiteti professori, f.-m.f.d

Zokir TEMIROV,

O'zbekiston Milliy universiteti o'qituvchisi

Anvar SULTONOV,

O'zbekiston Milliy universiteti magistranti

O'zR FA Polimerlar kimyosi va fizikasi instituti katta ilmiy xodimi dotsent N. Ashurov taqrizi asosida

PHYSICAL BASIS OF FORMATION OF LAYERED NANO FIBERS MATERIALS AND COMPOSITE COATINGS

Annotation

Using the electrospinning device, the optimal conditions for obtaining nanofibers from a 10% solution of Co-AN were selected, according to which a 25 kV voltage was applied to the filler ($\varnothing < 1$ mm), i.e., the anode, installed in the solution reservoir syringe, and such a voltage was under the cover, nanofibers were formed at a distance of 12-15 cm from the filter to the screen (cathode).

The electrolysis process was carried out for 4-14 hours at $I = 2$ mA, $I = 4$ mA and $I = 8$ mA. At 4 mA and 8 mA, macroions were restored on the surface of the electrodes, and their amount was 65-70% of the macroions in the solution.

Key words: electrospinning, electrolysis, composite coating, macroion, biopolymer.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОИСТЫХ НАНОВОЛОКОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация

С помощью электроспиннинг устройства были подобраны оптимальные условия получения нановолокон из 10% раствора Co-AN, согласно которым к наполнителю ($\varnothing < 1$ мм), т.е. аноду, подавали напряжение 25 кВ, установленное в шприц с резервуаром для раствора, и такое напряжение было под крышкой, нановолокна образовывались на расстоянии 12-15 см от фильтра до экрана (катод).

Процесс электролиза проводили в течение 4-14 часов при $I = 2$ мА, $I = 4$ мА и $I = 8$ мА. При 4 мА и 8 мА макроионы восстанавливались на поверхности электродов, и их количество составляло 65-70% макроионов в растворе.

Ключевые слова: электроспиннинг, электролиз, композиционное покрытие, макроион, биополимер.

QATLAMLI NANOTOLALI MATERIALLAR VA KOMPOZIT QOPLAMALAR SHAKLLANTIRISHNING FIZIK ASOSLARI

Аннотация

Elektrospinning qurilmasi yordamida, Co-AN ning 10 % li eritmasidan nanotola olish uchun optimal sharoit tanlandi, unga binoan eritma solinadigan rezirvuvar shpritsga o'rnatilgan fileraga ($\varnothing < 1$ mm), ya'ni anodga 25 kV doimiy kuchlanish berildi va bunday kuchlanish ta'siri ostida feleradan ekran (katod) gacha bolgan 12-15 sm masofada nanotolalar shakllantirish amalga oshirildi.

Elektroliz jarayoni tok kuchining $I = 2$ mA, $I = 4$ mA va $I = 8$ mA bo'lganda 4-14 soat davomida olib borildi. Tok kuchining 4 mA va 8 mA bo'lganda elektrodlar sirtida makroionlar tiklanganligi va ular miqdori eritmadagi makroionlarning 65-70 % ni tashkil etgan.

Kalit so'zlar: elektrospinning, elektroliz, kompozit qoplama, makroion, biopolimer.

Kirish. Hozirgi kunda zamonaviy materialshunoslik fizikasi va nanofizika sohasida olib borilayotgan ilmiy-tadqiqotlar yangi, noyob va maxsus fizik xossalari materiallar yaratishga yo'naltirilgan. Bunday ilmiy izlanishlar qatoriga fizik jarayonlarni amalga oshirishga asoslangan elektrospinning usulida polimer eritmalardan nanotolalar va nanotolali materiallar shakllantirish ham kiradi.

Bundan tashqari ionogen polimerlar asosida ma'lum maqsadlarga mo'ljallangan, jumladan, sirt faol qoplamalar olinishi dolzarb vazifalardan bo'lib, uning yechimiga makroionlar va ionlarni elektr maydon ta'sirida elektrodga siljishi va turli shaklli metallar yuzasida tiklanishini chuqurlashtirilgan tarzda tadqiqot qilgan holda erishish mumkin.

Polimerlarning elektrokimyoviy tiklanishini amalga oshirish uchun ularning polielektrolit eritmalarini tayyorlash hamda elektr maydoni ta'sirida ionogen makromolekularini ulkan makroionlar sifatida siljish imkoniyatlarini o'rganishni taqazo etadi. Ionogen biopolimerlar, jumladan, xitozan va fibroinni makroionlar sifatida elektr maydoni ta'sirida eritmalarda

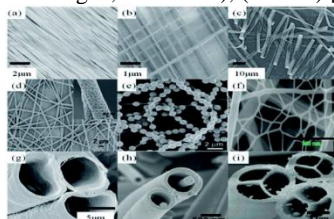
siljishi va elektrokimyoviy tiklanishi hamda uning asosida mikro- va nanoqoplamalar shakllantirish imkoniyatlari paydo bo'ladi.

Mavzuga oid adabiyotlar tahlili. Nanotola noyob xususiyatlari innovatsion strategiyalarni taklif qiladi va barqaror energiya ishlab chiqarish va biotibbiyotga ijodiy yechimlar uchun imkoniyatlar, sog'liqni saqlash va ekologik muammolarni hal etishda asosiy omillardan deb hisoblashga ilmiy asoslar mavjud [1]. Elektrosinning texnologiyasi yuqori quvvatli kompozit materiallar, elektron qurilmalar ishlab chiqarish, dori vositalarini etkazib berish, oziq-ovqat mahsulotlarini qadoqlash, membranani filtrlash kabi sohalar uchun keng assortimentdagi nano o'lchamdagi tolalarni tayyorlashda keng qo'llaniladi[2].

Elektrosinning soddaligi, arzonligi, ommaviy ishlab chiqarish potentsiali va nanotolalar tarkibini, diametrini nazorat qilish imkoniyati tufayli eng ko'p qo'llaniladigan usuldur[3].

Nanomateriallarning xalqaro miqyosda qabul qilingan yagona ta'rifi mavjud emas. Haqiqatan ham, ular ko'pincha nanozarrachalar (NZ), nanotrubbkalar, nanotolalar, nanosimlar yoki nanorodlar sifatida yaratilgan[4].

Nanotolalar tabiatiga ko'ra tasniflanadi (tabiiy va sun'iy nanotolalari), tarkibi (organik, noorganik, uglerod va kompozit nanotolalar), tuzilishi (qattiq, g'ovakli, g'ovak bo'lmagan, ichi bo'sh), (1-rasm) [5,6].

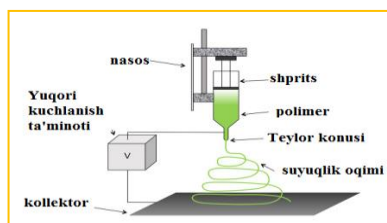


1-rasm. Turli xil nanotolalar morfologiyalari.

Tabiiy polimerlar, masalan, kollagen [7,8], elastin [9] va xitozan [10] ayniqsa, yaralarni yopish tibbiyot sohasida samarali hisoblanadi. Ular tabiatan biologik faol hisoblanib tabiiy mexanizmlar orqali qayta tuzilishi va buzilishi mumkin. Ular ham mumkin o'ziga xos gemostatik va mikroblarga qarshi faollikni namoyon qiladi, natijada yara bitishini tezlashtiradi [11].

Kang D. G., J. Spitzer, va B Poolman o'zlarining ilmiy ishlarida polielektrolitlarga tashqi kuchlar, jumladan, mexanik yoki elektr kuchlanishlar ta'sir etganda, gradiyentli maydon [12] lar vujudga keladi va bu maydonlarning kuch chiziqlari bo'ylab makroionlar siljishi [13] keltirib o'tganlar. Wang T., Xu C. va boshqa olimlar bunday maydonlar, masalan, mexanik bosim ostida kapillyardan suyuqlik oqqanda, suyuqlikni rotor yordamida barqaror laminar oqim [14] hosil etib aylantirilganda yoki elektroforez va elektroliz jarayonlarida ionlar va makroionlar [15] ni qutblar (elektrodlar) tomon siljishida kuzatilishini o'rgangan.

Tadqiqot metodologiyasi. Nanotolalar shakllantirishda eng zamonaviy usullardan biri elektrosinning bo'lib, bu usulning prinsipial asosi aslida 1934 yilda tavsifiya etilgan. Unda eritma oqimi bo'ylab yuqori kuchlanishli doimiy elektr maydoni ta'sir ettirilganda, erituvchini bug'lanishi hamda polimer molekullari bir-biriga orientatsion birikib 10 – 30 sm masofada tolalar shakllanishi kuzatilgan (2-rasm). Buning uchun yaqin maydonli elektrosinning (*near-field electrospinning process*) qo'llanilgan va uning samaradorligi hozirda jadal rivojlanayotgan polimer nanotolalar olishning yangi davri boshlab bergan [16].



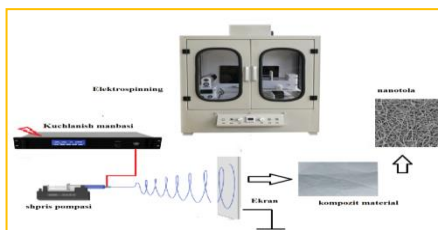
2-rasm. Elektrosinning jarayonining prinsipial chizmasi

Elektr maydonida fileradan chiqayotgan polimer suyuq fazali oqimdan erituvchining bug'lanishi va makromolekulalarning orientatsion eshilgan holda nanotolalar bo'lib shakllanib ekranga borib tushadi.

Biopolimerlar asosida sirtida kompozit qoplama hosil qilishda elektroliz usuli juda samarali hisoblanadi. Tadqiqodning asosiy masalasi ionlar elektrolizi usuli vositasida metall sirtida kompozit biofaol moddalar asosida qoplamalar yaratishning fizik asoslarini va ular uchun biofaol moddalarni aniqlashdan iboratdir.

Biopolimer kompozit qoplamalar shakllantirishda fosfat, kalsiy, mis, oltin, nikel ionlari, hamda xitozan, fibroin va shu kabi biofaol polimerlar – makroionlar shunday moddalar bo'lishi mumkin ekanligiga ilmiy asoslar mavjud. Bunda asosiy masala berilgan moddalar asosida qoplamalar hosil qilish uchun elektroliz parametrlarini aniqlashdir. Elektrolizning metall elektrodga beriladigan (0,1 – 10 mA) doimiy tok diapazoni, temperatura diapazoni (30 – 70 °C), tanlangan biologik faol moddalar eritmalari va aralashmalari konsentratsiyalari (0,1 – 10 %), elektroliz o'tkazish vaqti (1 - 20 soat) kabi asosiy parametrlari namoyon etiladi.

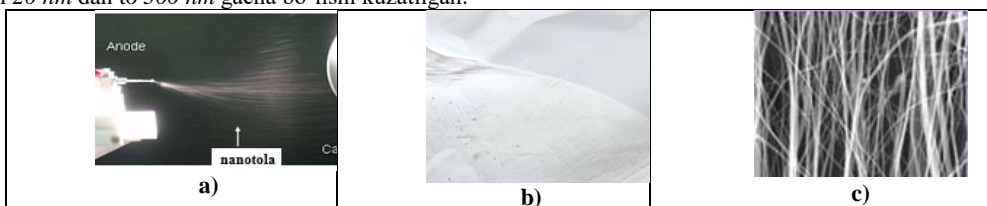
Tahlil va natijalar. Elektrosinning. Mahalliy polimer xom-ashyolar asosida nanotolalari noto'qima materiallar yaratishning texnologiyalarini amalga oshirish bo'yicha ilmiy-tadqiqotlar olib borilmoqda. Ushbu tadqiqotlar hozirda yuqori texnologik yondoshishga asoslangan elektrosinning uskunasi yordamida olib borilgan (3-rasm).



3-rasm. Elektrospinning qurilmasi

Ushbu elektrospinning qurilmasi yordamida, Co-AN ning 10 % li eritmasidan nanotola olish uchun optimal sharoit tanlandi, unga binoan eritma solinadigan rezirvuar shpritsga o'ratilgan fileraga ($\varnothing < 1$ mm), ya'ni anodga 25 kV doimiy kuchlanish berildi va bunday kuchlanish ta'siri ostida feleradan ekran (katod) gacha bo'lgan 12-15 sm masofada nanotolalar shakllantirish amalga oshirildi. 4-rasmda elektrospinning usulida shakllantirilgan Co-AN nanotolalarining nanoto'qima materialdagi strukturaviy joylashishining tasviri keltirilgan.

Bunda tolalar o'lchami 50 - 200 nm atrofida bo'lib, ular orasidagi g'ovaklar hosil bo'lgan. Ushbu g'ovaklar o'lchamlari 20 nm dan to 300 nm gacha bo'lishi kuzatilgan.



4-rasm. Nanotola shakllantirishning elektrospinning jarayoni fotosurati (a) Co-AN nanotolalarini noto'qima material sifatidagi fotografiyasi (b) va SEM tasviri aylanuvchi tsilindrda olingan nanotolalar (c).

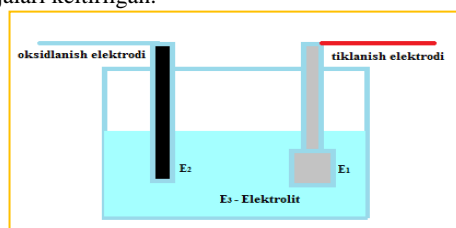
Tadqiqotlar, nanotolalar o'lchamlari va ularni noto'qima materiallarda ma'lum bir tartibda joylashishi va aniq bir o'lchamlarda nanog'ovaklar hosil qilib shakllantirish imkoniyatlari mavjudligi ko'rsatdi.

Elektroliz. Sirtiga qum qog'ozlar ishlov berish orqali mikroo'lchamli chuqurchalar hosil qilingan metall plastinkalar, shuningdek, turli geometrik shaklga ega metall shtirlar, ayniqsa, texnikada butlovchi qismlarida qo'llanadigan rez'bali "shtirlar" tiklanish elektrodi sifatida qo'llangan.

Qurilma elektroliz yacheykasida tiklanish (E_1) elektrodi sifatida $1 \times 5 \times 0,1$ sm³ o'lchamli titan plastinka va temir shtir hamda oksidlanish elektrodi sifatida grafit (E_2) sterjen (\varnothing 0,5 sm) ishlatilgan. Fibroin (*biopolimeri tanlab olingan*) makroionlarini metall ionlar singari elektrod sirtida elektrokimyoviy tiklanishi Faradey qonuniga ($m = kIt$) binoan quyida 5-rasmda fotosurati keltirilgan elektroliz qurilmasida tadqiqot qilingan.

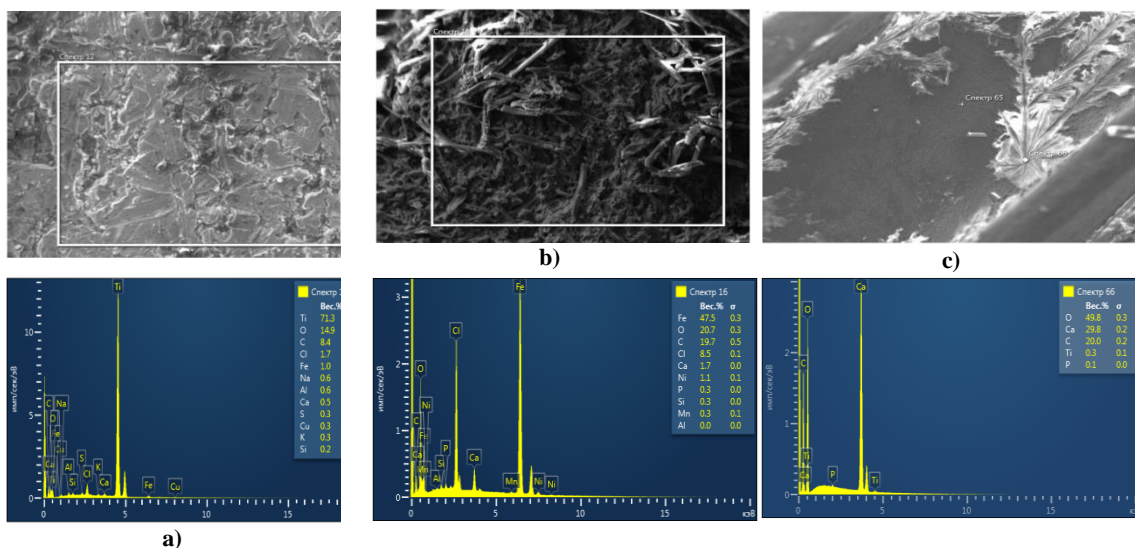
Elektroliz jarayoni tok kuchining $I = 2$ mA, $I = 4$ mA va $I = 8$ mA bo'lganda 4-14 soat davomida olib borildi. Elektroliz vaqti tugagach elektr maydoni ta'sirida elektrodga yetib kelgan va tiklanmagan makroionlarni qayta erib ketishi uchun elektrodlar yacheykada yana 2 soat davomida ushlab turildi. So'ng elektrodlar yacheykadan olinib, xona haroratida quritildi hamda elektrolizdan oldingi (m_1) va keyingi (m_2) massalari analitik tarozida $\pm 0,0001$ g aniqlikda o'lchanib, ular orasidagi farqlar $\Delta m = m_2 - m_1$ topildi.

Makroionlar va ionlarni birgalikda elektrokimyoviy tiklanishi 6.a,b,c - rasmda keltirilgan ZEISS SIGMA SEM 500 elektron mikroskopik tadqiqotlari natijalari keltirilgan.



5-rasm. Elektroliz qurilmasi sxematik ko'rinishi.

Tavsirda 3 ta tavsifli soha AZtec dasturi vositasida spektral tahlil qilingan va ularni mos ravishda titan plastika (spektr 12), hamda FB va tuz ionlarining $Ca_3(PO_4)_2$ (uchkalsiyfosfat) aralashmasiga (spektr 66) tegishli ekanligi aniqlangan. Ushbu spektrlar 6 a,b,c-rasmda nisbiy impuls quvvatining (imp/sek/ev) berilgan quvvat (eV)ga bog'liqlik spektrlari ko'rinishida tavsirlangan. Shuningdek, temir plastinka sirtida (16 spektr) 1,7% Ca ni aniqlanishi, ushbu ionni elektroliz paytida makroionlarga nisbatan oldinroq titan sirtiga yetib kelib elektrokimyoviy tiklanganligidan dalolat beradi.



6-rasm. Turli sirtlarda polimer kompozit qoplamalar tiklanishining SEM tasvirlari va spectral tahlili.

(kalsiy), 0.3-0.4% P (fosfor), 53% Ti (titan) va 47 % Fe (temir) ekanligi ko'rsatdi. Bu natija kompozit qoplamaning ushbu qismida asosan $Ca_3(PO_4)_2$ tiklanganligidan dalolat beradi.

Tok kuchining 4 mA va 8 mA bo'lganda elektrodlar sirtida makroionlar tiklanganligi va ular miqdori eritmadagi makroionlarning 65-70 % ni tashkil etgan. Ushbu tasvirlar makroionlarning elektrod sirtida tiklanishi, ya'ni titan, temir plastinka va shtirlar sirtida elektron almashish natijasida birikib, neytrallashib kompozit qoplama hosil qilganligidan dalolat beradi.

Xulosa va takliflar. Xulosa qilib, mahalliy akrilonitril sopolimeri DMFA dagi eritmasi asosida maxsus zamonaviy elektrosinning qurilmasida qalinligi 50-200 nm nanotolalar va qalinligi 50 nm – 500 mkm gacha bo'lgan qatlamli nanotolali noto'qima materiallar shakllantirilgan hamda ularning asosiy fizik tavsiflari, jumladan, nanog'ovaklarining o'chami 10-20 nm atrofida bo'lishi aniqlangan.

Elektroliz usulida polimer makroionlarining metall sirtlarda tiklanishi hamda ular asosida makroionlar va ularning tuz ionlari bilan birgalikda elektrokimyoviy tiklanish jarayonini samarali amalga oshirish bo'yicha tadqiqotlar bajarilgan va optimal sharoitlar aniqlangan va elektroliz qurilmasida biopolimer konsentratsiyasi 0,04 – 0,5 g/dl diapazonda, tok kuchini 2 – 8 mA intervalida va elektroliz vaqtini 4 – 14 soat oralig'ida amalga oshirgan holda kompozit qoplamalar shakllantirish imkoniyatlari ko'rsatib berilgan.

ADABIYOTLAR

1. A. Barhoum, K.Pal, H.Rahier, H. Uludag,I.S.Kim, M. Bechelany Nanofibers as new-generation materials: From spinning and nano-spinning fabrication techniques to emerging applications. Applied Materials Today Volume 17, 2019 <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.06.015>
2. Kanakaraj Aruchamy, Ashesh Mahto, S.K. Nataraj. Electrospun nanofibers, nanocomposites and characterization of art: Insight on establishing fibers as product Nano-Structures & Nano-Objects, Volume 16, 2018, pp. 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2018.03.013>
3. Lee H, Phan DN, Kim M, Sohn D, Oh SG, Kim SH, Kim IS. The Chemical Deposition Method for the Decoration of Palladium Particles on Carbon Nanofibers with Rapid Conductivity Changes. Nanomaterials (Basel). 2016 Nov 29;6(12):226. doi: 10.3390/nano6120226
4. Jeevanandam, J., et al., Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. Beilstein journal of nanotechnology, 2018. 9: p. 1050. 6.
5. Teo, W.E. and S. Ramakrishna, A review on electrospinning design and nanofibre assemblies. Nanotechnology, 2006. 17(14): p. R89.
6. J. Ding, and G. Wei, Electrospinning: A facile technique for fabricating polymeric nanofibers doped with carbon nanotubes and metallic nanoparticles for sensor applications. RSC Advances, 2014. 4(94): p. 52598-52610.
7. Nayak, R., et al., Recent advances in nanofibre fabrication techniques. Textile Research Journal, 2012. 82(2): p. 129-147.
8. Rho, K.S., et al., Electrospinning of collagen nanofibers: effects on the behavior of normal human keratinocytes and early-stage wound healing. Biomaterials, 2006. 27(8): p. 1452-1461.
9. Buttafoco, L., et al., Electrospinning of collagen and elastin for tissue engineering applications. Biomaterials, 2006. 27(5): p. 724-734.
10. Charernsriwilaiwat, N., et al., Lysozyme-loaded, electrospun chitosan-based nanofiber mats for wound healing. International Journal of Pharmaceutics, 2012. 427(2): p. 379-384.
11. Sadri, M., et al., New wound dressing polymeric nanofiber containing green tea extract prepared by electrospinning method. Fibers and Polymers, 2015. 16(8): p. 1742-1750.

12. Nasybulin, E., et al., Morphological and spectroscopic studies of electrochemically deposited poly (3,4-ethylenedioxythiophene)(PEDOT) hole extraction layer for organic photovoltaic device (OPVd) fabrication. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2011. 115(10): p. 4307-4314.
13. Kim, M., et al., Flexible lateral organic solar cells with core-shell structured organic nanofibers. *Nano Energy*, 2015. 18: p. 97-108.
14. Manjiri A. Mahadalkar, Hyun Park, Mohammad Yusuf, Saravanan Nagappan, Muthuchamy Nallal, Kang Hyun Park. Electrospun Fe doped TiO₂ fiber photocatalyst for efficient wastewater treatment. *Chemosphere Volume 330*, July 2023, 138599. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138599>
15. Wang T., Xu C. Liquid-liquid-liquid three-phase microsystem: hybrid slug flow-laminar flow // *Lab on a Chip*. – 2020. – T. 20. – №. 11. – С. 1891-1897.
16. Sheema Khan, David Ronis. A variational approach to static correlations in dilute macro-ion suspensions. *Molecular Physics* 60:3, pages 637-662.



UO'K 524.74:524.77

Fazliddin SHAMSHIYEV,
O'zbekiston Milliy universiteti dotsenti, f.-m.f.n.
E-mail: shamshiyev_f@nuu.uz

O'zRFA Astronomiy instituti dotsenti, f.-m.f.n. Y.Tillayev taqrizi asosida

QO'SHALOQ GALAKTIYALARNING JAMLANMA KATALOGI HAQIDA VA ULARNING STATISTIK TAHLILI

Annotation

Bu ishda qo'shaloq galaktikalarning mavjud kataloglari va zamonaviy kuzatuv ma'lumotlarini o'rganish asosida 613 ta juft ob'yektdan iborat jamlanma katalog yaratildi. Statistik tahlil o'tkazildi: juftliklar orasidagi burchak va chiziqli masofalar hisoblab chiqildi, galaktikalarning umumiy va individual massalari hisoblandi, gistogrammalar chizilad va korrelyatsiya koeffitsientlari hisoblab chiqildi.

Kalit so'zlar: qo'shaloq galaktikalar kataloglari, statistik tahlil.

О СВОДНОМ КАТАЛОГЕ ДВОЙНЫХ ГАЛАКТИК И ИХ СТАТИСТИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ

Аннотация

В данной работе на основе изучения существующих до настоящего времени каталогов двойных галактик и современных наблюдательных данных создан их сводный каталог, состоящий из 613 пар объектов. Проведен статистический анализ: вычислены угловые и линейные расстояния между парами, оценены суммарная и отдельные массы галактик, построены гистограммы, вычислены корреляционные коэффициенты.

Ключевые слова: каталоги двойных галактик, статистический анализ.

ABOUT THE CONSOLIDATED CATALOG OF BINARY GALAXIES AND THEIR STATISTICAL ANALYSIS

Annotation

In this work, based on the study of existing catalogs of binary galaxies and modern observational data, a consolidated catalog consisting of 613 pairs of objects was created. A statistical analysis was carried out: angular and linear distances between pairs were calculated, the total and individual masses of galaxies were estimated, histograms were constructed, correlation coefficients were calculated.

Keywords: catalogs of binary galaxies, statistical analysis.

Introduction. It's not hard to understand that if two objects occupy a mutually close distance to each other in the sky, it doesn't always mean they form a binary system. They can be quite far apart and not gravitationally connected to each other.

In binary galaxies, the proper motions of the components are so small that they are difficult to determine even after many years of observation. This is where difficulties arise in determining whether it is an optical or physical double. Therefore, a statistical method of selecting binary stars is used to determine binary galaxies. One has to rely on a certain criterion, the fulfillment of which makes the physicality of a binary galaxy quite likely. However, it is difficult to find a generally accepted formulation of the definition of binary galaxies in modern literature.

In astrophysics, the birth, life, and evolution of binary stars have been studied in detail and their theory has been developed. However, the physics of binary galaxies has not been resolved to this day. For example, the following questions remain open:

1. How are binary galaxies born?
2. What types of binary galaxies exist?
3. What is the distribution of these types of galaxies by distance and physical parameters?
4. Do binary galaxies influence the development process of large systems, for example, clusters and superclusters of galaxies as a whole?
5. It is clear that due to tidal forces and dynamic friction, star formation in close binary systems and evolution there occur more intensively than in single galaxies, but this question is not fully studied.
6. Do pairs of galaxies have a common origin or is it a result of mutual capture?
7. One of the main tasks of extragalactic astronomy - determining the mass of components by rotation curves or by the virial theorem (which is directly related to the problem of dark matter) is still waiting for its solution and others.

To date, some of these problems have been studied by a number of authors and catalogs and atlases of binary galaxies have been compiled. For example, the catalogs of Holmberg, Zwicky, Karachentsev, Turner, 1976, Tully, etc. [1-7]. In addition to these catalogs, there are atlases and catalogs of Arp and Vorontsov-Velyaminov, where you can also find binary

galaxies [8, 9]. The aforementioned catalogs differ from each other in the number of objects, the physical and geometric quantities of pairs, and overall their approach to the problem and purpose. Our tasks in this work are:

- conducting a review and studying the existing catalogs and atlases of binary systems to date;
- based on observational data from recent years, compiling a consolidated catalog of binary galaxies, conducting its statistical analysis;
- determining the angular and linear distances between components;
- estimating the total mass and mass of individual components of binary galaxies using formulas proposed in the work by Heisler and Tremaine [10].

Brief review of catalogs and atlas. Arp's work "Atlas of Peculiar Galaxies" contains information about various peculiar structures found in neighboring galaxies [8]. Arp emphasized that the process of forming elliptical and spiral galaxies is not well studied. The atlas has little information about the physical processes that affect the shape of galaxies, and therefore galaxies are classified based on their appearance. Objects from 1 to 101 represent individual peculiar spiral galaxies with small components. Objects from 102 to 145 - elliptical galaxies. Spiral and non-elliptical individual galaxies or groups of galaxies have numbers 146-268. However, in this atlas we are interested in objects from 269 to 327 - binary galaxies. And finally, objects not related to the above categories are listed under numbers 332-338. Interacting galaxies (colliding galaxies) are galaxies whose gravitational fields cause each other to collide. Examples of secondary interacting objects include a galaxy's moon or spiral arms. A major interaction can be called a galaxy collision, which can lead to the merger of galaxies. The morphological catalog of interacting galaxies compiled by Vorontsov-Velyaminov et al., includes 2014 pairs [9]. This catalog includes objects with declination more than -45 degrees and up to 15 stellar magnitudes. The first statistical study of binary galaxies was conducted by Swedish astronomer Holmberg in the work "Study of Binary and Multiple Galaxies" [1], who first compiled a catalog of 695 pairs. The catalog lists all pairs of galaxies, the distance to the components of which is less than twice the sum of their diameters. It can be assured that most of this catalog represents a physical binary galaxy. Karachentsev's catalog "Binary Galaxies in the Place of Supercluster and its Vicinity" is the most complete catalog of binary galaxies available today and contains 509 pairs selected from 10403 local galaxies with a radial velocity less than 3500 km/s, [3]. Physical binary galaxies are distinguished by the fact that their total energy is negative, and their components lie within the surface of zero velocity. Individual masses of galaxies are considered proportional to their total luminosity in the K-filter. The catalog contains information about stellar magnitude, morphological type, orbital mass and isolation index of galaxies. There is also Turner's catalog "Binary Galaxies", where 156 pairs are given [5, 6]. Turner extracted a sample of 156 binary systems of galaxies from Zwicky's catalog of galaxies and clusters of galaxies [2], using certain identification criteria. Stellar magnitude, morphological type, radial velocity, angular distance and other parameters of objects are given. Radial velocity was measured for both components of 66 pairs.

Tully compiled a catalog of nearby binary galaxies with a radial velocity of less than 3000 km/s [7]. This catalog contains 2367 galaxies with a diameter of 82 Mpc, which is comparable to the size of the cosmological homogeneity of the Universe. Using the hierarchical dendrogram method, Tully identified 179 groups in this catalog, comprising 69% of the studied galaxies. The study of binary galaxies is of great interest in considering the issue of their formation and evolution, and can also be widely used in studying the distribution of light and dark matter in pairs of galaxies. In his work [3], Karachentsev considered the problem of the distribution of light and dark matter in the volume of the Local Supercluster and its surroundings, which is comparable to a cosmological cell of homogeneity. It is known that gravitational lenses can also reveal concentrations of dark matter with sizes on the order of galaxy clusters. Work has already begun in this direction and their results suggest that in the future, when enough information about binary galaxies and gravitational lenses has been accumulated, it will be possible to build maps of galaxy clusters. It will also be possible to determine the angle of deviation of a light beam, which occurs according to the effect of gravitational lensing when passing around pairs of galaxies.

Consolidated catalog and statistical analysis of data. When compiling the consolidated catalog, we relied on the catalogs of the authors mentioned above and observational data from recent years. This resulted in the creation of the "Consolidated Catalog of Binary Galaxies", consisting of 613 pairs, which will be published separately. Below are some histograms, correlation coefficients, and empirical formulas.

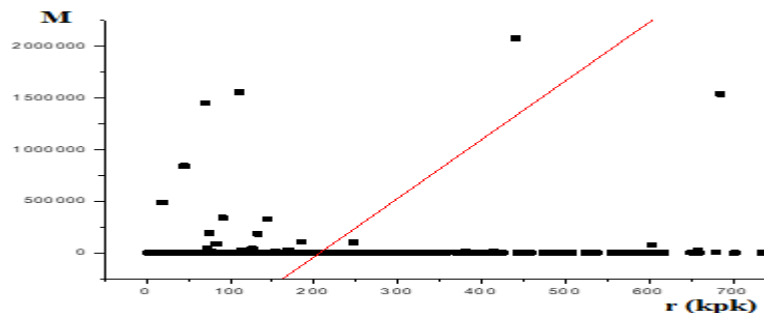


Fig.1. Dependence of the total mass M (109 solar masses) on the distance between the components r .

You can see the dependence $M = a + b \cdot r$. We determined the coefficients a and b by the method of least squares: $a = -1.18 \pm 59.41$, $b = 57.86 \pm 24.67$. The correlation coefficient $K = 0.69$ suggests that there is the indicated dependence between M and r .

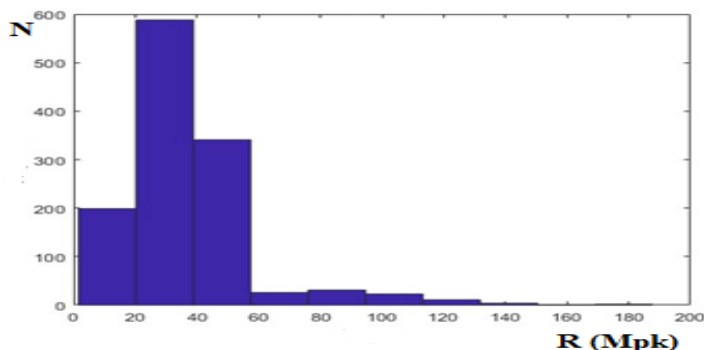


Fig. 2. Distribution of galaxy pairs by distances. Most pairs of galaxies are within 20 to 60 Mpc. V_r (km/s)

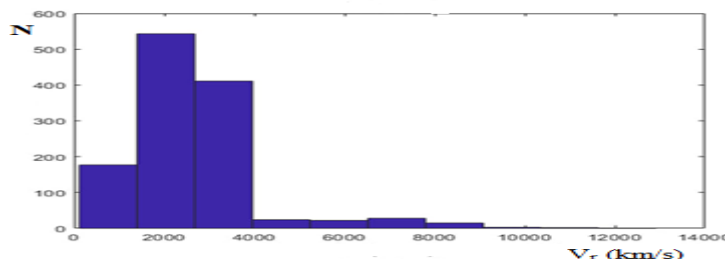


Fig. 3. Dependence of radial velocity V_r on the total number of galaxies N .

You can see a linear dependence $V_r = a + b \cdot R$, with coefficients $a = 225.23 \pm 24.92$, $b = 65.52 \pm 0.59$, and a correlation coefficient $K = 0.95$.

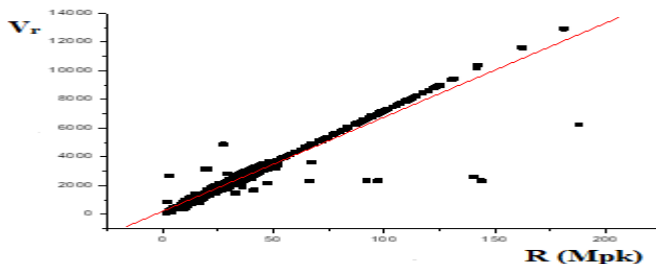


Fig.3. Dependence of radial velocity V_r on distance R .

The analysis of the obtained data on the types of binary galaxies, in percentage terms, is presented in Table 1. As can be seen from the table, binary galaxies are mainly composed of spiral galaxies.

Table 1. Types of Binary Galaxies.

№	Pair	Number	Percent (%)
1	E ÷ E	5	0,8
2	E ÷ S	29	4,7
3	E ÷ SO	8	1,3
4	E ÷ Ir	2	0,3
5	S ÷ S	340	55,5
6	S ÷ SO	81	13,2
7	S ÷ Ir	101	16,5
8	SO ÷ SO	20	3,3
9	SO ÷ Ir	14	2,3
10	Ir ÷ Ir	13	2,1

Conclusion. Let's list the main results: A review of the catalogs and atlases of binary, as well as interacting galaxies of Zwicky, Holmberg, Tully, Arp, Vorontsov-Velyaminov, Turner, Karachentsev and others available to date has been conducted. From these, binary galaxies were specifically identified; Angular and linear distances between pairs of galaxies were calculated and refined; • The total mass of galaxy pairs was calculated using formulas [Heisler and Tremaine, 1985], as well as the masses of each component; A consolidated catalog of binary galaxies consisting of 613 pairs was created, with radial velocities less than 13500 km/s, in a volume with a diameter of 200 Mpc. The catalog includes the ordinal number, name, equatorial coordinates RA (h m s) and RD ($^{\circ}$ ' "), type T, radial velocities V_r (km/s), mutual distance r (Kpc), apparent stellar magnitude m (mag), redshift z , distances to galaxies R (Mpc), total mass M and masses of each pair $M_{1,2}$ in units of solar mass; Correlations of quantities $(V_r ; r)$, $(V_r ; m)$, $(V_r ; z)$, $(V_r ; R)$, $(V_r ; M)$, $(V_r ; M_{1,2})$, $(r ; m)$, $(r ; z)$, $(r ; R)$, $(r ; M)$, $(r ;$

$M_{1,2}$), $(m; z)$, $(m; R)$, $(m; M)$, $(m; M_{1,2})$, $(z; R)$, $(z; M)$, $(z; M_{1,2})$, $(R; M)$, $(R; M_{1,2})$, $(M; M_{1,2})$ were calculated; a statistical analysis was carried out, histograms of the above quantities were constructed, some empirical formulas were found.

The work was supported by grant FZ 20200929344.

LITERATURE

1. Holmberg E. A Study of Double and Multiple Galaxies //Annals of the Observ. Of Lund., V.6.- P.5, 1937
2. Zwicky F., et al. VizieR Online Catalog: Galaxies and Clusters of Galaxies, 1968
3. Караченцев И. Д., Макаров Д.И., Астрофиз. бюллетень, т.63, №4, 2008
4. Karachentsev I.D., Astronom. J. 129, 2005
5. Turner E.L. Binary Galaxies. I. //Ap.J. 208: P.20-29, 1976
6. Turner E.L. Binary Galaxies. II. //Ap.J. 208: P.304-316, 1976
7. Tully B. B., Nearby Galaxies Catalog, Astrophys. J. 132, 729, 2006
8. Arp H., Astrophys. J. 256, 54, 1982
9. Vorontsov-Velyaminov B. A., et al. Astr. & Astrophys. Trans., 11 Dec.2007
10. Heisler J. and Tremaine S., The Astrophysical Journal, 298:8-17, 1985



UDK: 538.955; 621.3.082.782

Ulugbek ERKABOYEV,
Namangan injener-texnologiya instituti professori, d.n.f.-m
Nozimjon SAYIDOV,
Namangan injener-texnologiya instituti tayanch doktoranti
Ulugbeka NEGMATOV,
Namangan injener-texnologiya instituti tayanch doktoranti
E-mail: sayidovnozimjon@gmail.com

NamMQI professori, f.-m.f.d. M.Dadamirzayev taqrizi asosida

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПЛОТНОСТЬ КОМБИНИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

Аннотация

В работе исследуется зависимость комбинированных осцилляций плотности состояний от сильного магнитного поля в гетероструктурах на основе прямоугольных квантовых катушек. Исследовано влияние квантующего магнитного поля на температуру комбинированной плотности состояний в наноразмерных гетероструктурах реального поля. Разработана новая математическая модель для расчета температурной зависимости двумерной комбинированной плотности состояний квантовых катушек в квантующих магнитных полях. Предложенная модель объясняет экспериментальные результаты в наноразмерных полупроводниках с регулярным полем и параболической дисперсией.

Ключевые слова: гетероструктура, наноразмер, квантовая катушка, плотность состояний, плотность состояний, колебание, наноразмер, магнитное поле, двумерность, полупроводники.

EFFECT OF MAGNETIC FIELD AND TEMPERATURE ON THE DENSITY OF COMBINED STATES IN HETEROSTRUCTURES WITH QUANTUM WELL

Annotation

In this work, the dependence of the combined state density oscillations on the strong magnetic field in heterostructures based on rectangular quantum coils is studied. The influence of the quantizing magnetic field on the temperature of the combined density of states in nanoscale real-field heterostructures is studied. A new mathematical model has been developed to calculate the temperature dependence of the two-dimensional combined state density of quantum coils in quantizing magnetic fields. The proposed model explains the experimental results in nanoscale, regular field, parabolic dispersion semiconductors.

Key words: heterostructure, nanoscale, quantum coil, density of states, density of states, oscillation, nanoscale, magnetic field, two-dimensional, semiconductors.

KVANT O'RALI GETEROSTRUKTURALARDA KOMBINATSIYALANGAN HOLATLAR ZICHLIGIGA MAGNIT MAYDON VA HARORATNING TA'SIRI

Annotatsiya

Bu ishda to'g'ri burchakli kvant o'ralar asosidagi geterostukturalarda kombinatsiyalangan (birlashgan) holatlar zichligi ossilyatsiyasining kuchli magnit maydoniga bog'liqligi o'rganilgan. Nanoo'lchamli to'g'ri sohali geterostukturalarda kvantlovchi magnit maydonining kombinatsiyalangan holatlar zichligi haroratiga ta'siri o'rganilgan. Kvantlovchi magnit maydonlarida kvant o'ralarining ikki o'lchamli kombinatsiyalangan holat zichligining haroratga bog'liqligini hisoblash uchun yangi matematik model ishlab chiqilgan. Taklif etilgan model nanoo'lchamli, to'g'ri sohali, parabolik qonunga bo'ysunuvchi dispersiyali yarimo'tkazgichlardagi eksperimental natijalarni izohlaydi.

Kalit so'zlar: geterostuktura, nanoo'lcham, kvant o'ra, holatlar zichligi, holatlar zichligi, ossilyatsiya, nanoo'lcham, magnit maydon, ikki o'lchamli, yarimo'tkazgichlar.

Kirish. Bu ishda to'g'ri burchakli kvant o'ralar asosidagi geterostukturalarda kombinatsiyalangan (birlashgan) holatlar zichligi ossilyatsiyasining kuchli magnit maydoniga bog'liqligi o'rganilgan. Nanoo'lchamli to'g'ri sohali geterostukturalarda kvantlovchi magnit maydonining kombinatsiyalangan holatlar zichligi haroratiga ta'siri o'rganilgan. Kvantlovchi magnit maydonlarida kvant o'ralarining ikki o'lchamli kombinatsiyalangan holat zichligining haroratga bog'liqligini hisoblash uchun yangi matematik model ishlab chiqilgan. Taklif etilgan model nanoo'lchamli, to'g'ri sohali, parabolik qonunga bo'ysunuvchi dispersiyali yarimo'tkazgichlardagi eksperimental natijalarni izohlaydi.

Adabiyotlar taxlili. Ma'lumki, tashqi omillar (harorat, magnit maydoni va bosim)ning kvant o'lchamli geterostukturalarga ta'siri zaryad tashuvchilarning energetik satx holatlari o'zgarishiga va, natijada, magnitooptik yutilish chegarasining siljishiga olib keladi [1]. Nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlarning magnitooptik yutilish spektri ruhsat etilgan sohaning turli minimumlari orasidagi energetik masofa bilan aniqlanadi. Bundan kelib chiqadiki, kvant o'rasining ta'qiqlangan sohasi kengligi tashqi omillar ta'sirida yoki torayadi, yoki kengayadi. Shunday qilib, magnitooptik yutilish

spektrini uning chegarasi yaqinida o'rganish zaryad tashuvchilarning o'tkazish sohasi quyi chegarasi yaqinidagi va kvant o'rasining valent sohasi yuqori chegarasi yaqinidagi energetik spektri strukturasi to'g'risida ma'lumot beradi. Bu esa nanoo'lchamli yarimo'tkazgichlarning magnit, optik va elektrik xususiyatlarini aniqlashda juda muhimdir [2].

Kvant o'rasining kombinatsiyalangan holat zichliklari sohalararo magnitoptik yutilish ossillyatsiyasida muhim rol o'ynaydi. Shuning uchun, ko'p hollarda, Brilliyen sohasi doirasida (p_{cv}) matritsa elementi kam o'zgaradi. Binobarin, spektrning strukturasi asosan kvant o'lchovli geterostrukturalardagi holatlarning kombinatsiyalangan zichligini aniqlaydi [3].

Tadqiqot metodologiyasi. Ushbu tadqiqotning maqsadi kuchli magnit maydonining kvant o'ramli geterostrukturalarda kombinatsiyalangan holatlar zichligiga ta'sirini aniqlashdan iborat. Magnit maydoni ta'sirida o'tkazish sohasi energetik holatlari va kvant o'rasidagi valent sohasi zichligining zaryad tashuvchilarning energetik spektriga bog'liqligi pogona funksiyalarni tashkil qiladi (1-rasm) [4-5]:

$$g_c(E) = \frac{m_n^e}{\hbar^2 \pi} \sum_n \theta(E - E_n)$$

$$g_v(E) = \frac{m_n^h}{\hbar^2 \pi} \sum_m \theta(E - E_m) \quad (1)$$

Bu yerda, m_n^e i m_n^h – n va m o'lchamli kvant o'rasida o'lchamli kvantlash soha ostidagi elektronlar va teshiklarning effektiv massalari, $\theta(E)$ – Xevisaydning pog'onali funksiyasi.

To'g'ridan-to'g'ri sohalararo o'tishlarda holatlarning kombinatsiyalangan zichligi egergiya bo'yicha konversiyadan ibora bo'lib, u ham energiya bo'yicha pog'onali funksiya ko'rinishiga ega [6]:

$$N_{jds}^{2d}(E) = \frac{m_{mn}^*}{\hbar^2 \pi} \sum_{m,n} \theta(E - E_{mn}) \quad (2)$$

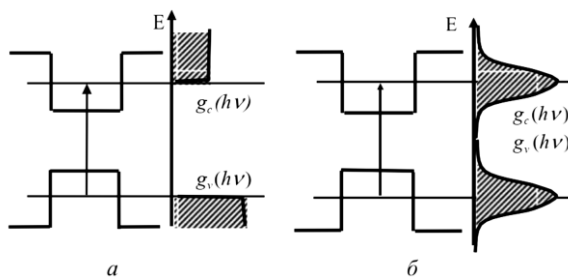
Bu yerda, m_{mn}^* – ushbu: $(m_{mn}^*)^{-1} = (m_n^e)^{-1} + (m_m^h)^{-1}$ munosabat bilan aniqlanuvchi, n va m o'lchamli soha osti kvantlash uchun zaryad tashuvchilarning keltirilgan effektiv massasi.

Agar GeSi strukturalarda elektron va teshik holatlari barcha uchta kvaziimpuls komponentlar bo'yicha o'lchamli-kvantlangan bo'lsa, ya'ni, zaryad tashuvchilar uchun kvant nuqtalari bo'lsa, u holda bunday strukturaning ruxsat etilgan sohasida holatlarning kombinatsiyalangan zichligi Gauss funksiyasi ko'rinishda bo'ladi (1-rasm). U holda, ruxsat etilgan sohada kamaymaydigan diskret funksiyadan iborat bo'lgan nol-o'lchovli kombinatsiyalanga holat zichligi mavjud bo'ladi [7].

Ushbu holda, kombinatsiyalangan holat zichligi $\delta(E)$ – Dirak delta-funksiyasi deb ataluvchi funksiya yordamida ifodalanadi:

$$N_{jds}^{0d}(E) = \sum_{l,m,n} \delta(E - E_{lmn}) \quad (3)$$

Kombinatsiyalangan holatlar zichligi cheksiz qisqa va baland cho'qqilarning majmuasidan iborat bo'ladi (1-rasm). Yuqorida olingan barcha natijalar kvantlovchi magnit maydoni, harorat va bosim ta'siri bo'lmagan holatlar uchun o'rinli. Quyidagi aniq savollar paydo bo'ladi:



1-rasm. GeSi/Si kvant-o'ra tuzilmalarida elektron holatlar zichligining energiya taqsimoti [8]: a – kvant o'ra, b – kvant nuqta.

Kuchli magnit maydoni mavjud bo'lganda, geterostrukturalarning kvant o'lchamli to'g'ridan-to'g'ri o'tishlaridagi kombinatsiyalangan holatlar zichligi qanday aniqlanadi? Harorat ko'tarilish dinamikasi ushbu jarayonga qanday ta'sir ko'rsatadi?

Keling, to'g'ridan-to'g'ri ruxsat etilgan o'tishli ikki o'lchovli yarimo'tkazgichlarda kombinatsiyalangan holatlar zichligining kvantlovchi magnit maydoniga bog'liqligini hisoblaymiz. Kvantlovchi magnit maydonida, kombinatsiyalangan holatlar zichligi magnitoptik o'tishda energiyani saqlanish qonuniga bo'ysinuvchi, kvant o'rasining o'tkazuvchan sohasida E_c energiyali, valent sohasida E_c energiyali barcha holatlar bo'yicha integral orqali aniqlanadi. Kuchli magnit maydon ta'sirida, kvant yamali to'g'risohali geterostrukturaning ta'qiqlangan sohasi chegarasi yaqinida soha strukturasi eng sodd modelini tahlil qilamiz. Ya'ni, kvant o'rasining valent sohasi zaryad tashuvchilar bilan to'la, o'tkazuvchan soha esa – bo'sh. Bu yerda, tegishli holatlarning to'ldirish funksiyalari $f_v=1$, $f_c=0$ ga teng. Bundan tashqari, ushbu modelda shovqinlanish darajasining parabolik dispersiya qonunli kvant o'rasining kombinatsiyalangan holat zichligiga bog'liqligini hisobga olmaslik mumkin. Magnit maydoni induksiyasi ko'ndalang (OZ o'qiga parallel) va XOY tekisligiga parallel yo'nalgan bo'ladi. Bu ko'ndalang kvant magnit maydoni deb ataladi.

Tahlil va natijalar. Bundan kelib chiqadiki, kuchli magnit maydoni mavjud bo'lganda, kvant o'ra holatlarining kombinatsiyalangan zichligini hisoblash uchun dispersiya energiyasi qonunlaridan foydalaniladi. Ularni quyidagicha yozish mumkin:

$$E_c^{2d}(B, d, n_{cZ}) = \left(N_L^c + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega_c^c + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_c d^2} n_{cZ}^2 + m_s^c g_c \mu_B H$$

$$E_v^{2d}(B, d, n_{vZ}) = -\left(N_L^v + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega_c^v - \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_v d^2} n_{vZ}^2 - m_s^v g_v \mu_B H - E_g^{2d}(0)$$
(4)

Bu yerda, N_L^c, N_L^v – kvant o'rasining ruxsat etilgan sohasidagi zaryad tashuvchilarning Landau satxlari soni; ω_c^c, ω_c^v – kvant o'rasining o'tkazuvchan va valent sohalarida magnit maydonining siklotron chastotasi; d – kvant o'rasi qalinligi; n_{cZ}^2, n_{vZ}^2 – kvant o'rasining o'tkazuvchan va valent sohalarida o'lchamli kvantlash qism-sohasining tartib raqami; n_{eZ}, n_{vZ} – mos ravishda Z o'qi bo'yicha elektronlar va teshiklarning kvantlash satxlari tartib raqamlari; elektron va valent sohalar simmetrik deb faraz qilamiz, u holda, $n_{eZ} = n_{vZ} = n_Z$ shart bajariladi; $m_s^c g_c \mu_B H, m_s^v g_v \mu_B H$ – ruxsat etilgan sohadagi spin energiyasi; $E_g^{2d}(0)$ – absolyut nol haroratda kvant o'rasi ta'qiqlangan sohasining kengligi; V – magnit maydoni induksiyasi.

$E_c^{2d}(B, d, n_Z)$ va $E_v^{2d}(B, d, n_Z)$ lar uchun, spinni hisobga olmaganda, magnitoptik o'tishlar energiyaning saqlanish qonuniga mos keladi:

$$E_{cv}^{2d}(B, d, n_Z) = E_c^{2d}(B, d, n_Z) - E_v^{2d}(B, d, n_Z)$$

$$E_{cv}^{2d}(B, d, n_Z) = E_g^{2d}(0) + \left(N_L^c + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega_c^c + \left(N_L^v + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega_c^v + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_{cv}^* d^2} n_Z^2$$

$$h\nu \geq E_{cv}^{2d}(B, d, n_Z)$$
(5)

Bu yerda, $h\nu$ – yutilayotgan fotonning yutiluvchi energiyasi, ν – yorug'lik energiyasi, $\frac{1}{m_{cv}^*} = \frac{1}{m_c^*} + \frac{1}{m_v^*}$ – kombinatsiyalangan (keltirilgan) effektiv massa [9].

OZ o'qi yo'nalishi buyicha, kuchli magnit maydoni zaryad tashuvchilar uchun energiya va to'lqin vektori orasidagi nisbatni o'zgartirmaydi. Biroq, zaryad tashuvchilarning magnit induksiyasiga perpendikulyar yo'nalishdagi (XY tekislikda) harakati uchun energetik sathlarning avvalgi kvaziuzluksiz qatori Landauning diskret satxlari sistemasi bilan almashadi. Elektronlar va teshiklarning effektiv massalari teng deb olinayotganligi sababli, Landau sathlari orasidagi masofa kvant soniga bog'liq bo'lmaydi va u $\hbar \omega_s$ ga teng bo'ladi. Demak, kvant o'rasining o'tkazuvchan va valent sohalarida erkin elektronlar va teshiklarning har uchchala yo'nalish bo'yicha harakati cheklangan. Kvantlovchi magnit maydoni ta'sirida kvant o'rasi kvant nuqtasi analogiga aylanadi. (3) formulaga muvofiq, $\delta(E - E_{lmn})$ argumentda E ni $h\nu$ ga va E_{lmn} ni $E_{cv}^{2d}(B, d, n_Z)$ ga almashtirib, quyidagiga ega bo'lamiz [9-11]:

$$N_{ds}^{2d}(h\nu, E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_Z)) = \frac{eB}{\pi \hbar} \sum_{N_L^c, N_L^v, n_Z} \delta(h\nu - E_{cv}^{2d}(B, d, N_L^{cv}, n_Z))$$
(6)

Xulosalar. Shunday qilib, kvantlovchi magnit maydon ta'sirida kvant o'rasining kombinatsiyalangan holat zichligini aniqlash uchun (6) formuladan foydalanish mumkin. Biroq, bunday formulalarda to'g'risohali kvant o'ralari uchun harorat va bosimning elektronlar va teshiklarning diskret Landau sathlariga ta'siri hisobga olinmaydi. Magnitoptik yutilish spektri ko'plab xajmli va kichik o'lchamli optoelektron asboblari uchun asosiy talab hisoblanadi. Kvant o'rali va $\alpha_B^{2d}(h\nu, B, d)$ to'g'risohali geterostrukturalarda magnitoptik yutilish jarayonini kombinatsiyalangan holatlar zichligi funksiyasi sifatida ifodalash mumkin. Kvantlovchi magnit maydoni ta'siri ostida, kombinatsiyalangan holatlar zichligi $h\nu$ foton energiyasi bilan ajralgan, to'lgan valentli soha elektron holatlari bilan o'tkazuvchan sohaning bo'sh elektron holatlari orasidagi ruxsat etilgan magnitoptik o'tishlar sonining me'yorini ta'minlaydi. Taniqli ilmiy adabiyotlarda magnit maydoni mavjud bo'lgan va bo'lmagan holatlarda ruxsat etilgan soha energetik holat zichligini kombinatsiyalangan holat zichligi bilan bog'lash bo'yicha bir necha urinishlar to'g'risida ma'lumotlar berilgan. Biroq, kombinatsiyalangan holat zichligining olingan barcha empirik va soddalashtirilgan ifodalari past haroratlarda bosimning yo'qligi bilan chegaralangan.

ADABIYOTLAR

1. L.R.Ram Mohan, Peter A.Wolff. Joint density of states in interband transitions in semiconductors in a magnetic field // Physical Review B. 1982. Vol.26, No.12. pp. 6711-6718.
2. Anand Kulkarni, Durdu Guney, Ankit Vora. Optical absorption in nano-structures: classical and quantum models // ISRN Nanomaterials. 2013. Vol.2013, Article ID 504341, pp. 1-7. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/504341>
3. Gulyamov, G., Erkaboev, U.I., Rakhimov, R.G., Sayidov N.A. The influence of temperature on magnetic quantum effects in semiconductor structures // Journal of Applied Science and Engineering, 2020, 23(3), pp. 453-460, <https://www.scopus.com/sourceid/21100822732>
4. Erkaboev, U.I., Rakhimov, R.G., Sayidov N.A. Mathematical modeling determination coefficient of magneto-optical absorption in semiconductors in presence of external pressure and temperature // Modern Physics Letters B, 2021, 35(17), 2150293, <https://www.scopus.com/sourceid/29055>
5. Erkaboev, U.I., Gulyamov, G., Mirzaev, J.I., Rakhimov, R.G., Sayidov N.A. Calculation of the Fermi-dirac function distribution in two-dimensional semiconductor materials at high temperatures and weak magnetic fields // Nano, 2021, 16(9), 2150102, <https://www.scopus.com/sourceid/11300153732>
6. Erkaboev U.I., Sayidov N.A., Rakhimov R.G., Mirzaev J.I. Modeling the temperature dependence of the density oscillation of energy states in two-dimensional electronic gases under the impact of a longitudinal and transversal quantum magnetic fields // Indian Journal of Physics, 2022, <https://www.scopus.com/sourceid/145208>
7. Erkaboev, U.I., Sayidov N.A., Negmatov, U.M., Rakhimov, R.G., Mirzaev, J.I. Influence of a quantizing magnetic field on the Fermi energy oscillations in two-dimensional semiconductors // International Journal of Applied Science and Engineering, 2022, 19(2), 2021123, <https://www.scopus.com/sourceid/21100822732>
8. <https://www.scopus.com/sourceid/21100822732>
9. Baymatov P.J., Gulyamov A.G., Abdulazizov B.T., Mavlyanov Kh.Yu., Tokhirjonov M.// Features of the Chemical Potential of a Quasi-Two-Dimensional Electron Gas at Low Temperatures Features of the Chemical Potential of a

- Quasi-Two-Dimensional Electron Gas at Low Temperatures // International Journal of Modern Physics B 2150070 (1-13), 2021, <https://doi.org/10.1142/S0217979221500703>
10. Gulyamov G., Abdulazizov B.T., Baymatov P.J. // Three-band simulation of the g-factor of an electron in an InAs quantum well in strong magnetic fields // Journal of Nanomaterials, Volume 2021, Article ID 5542559, <https://doi.org/10.1155/2021/5542559>
 11. Abdulazizov B.T. /Cyclotron mass of an electron in strong magnetic fields in a wide InAs quantum well/ Eurasian Journal of Physics and Functional Materials 2022, 6(1), 32-37, DOI:10.32523/ejpfm.2022060103
 12. Abdulazizov B. T., Gulyamov G., Baymatov P. J., Inoyatov Sh. T., Tokhirjonov M. S. and Juraev Kh. N. //Peculiarities of the Temperature Dependence of the Chemical Potential of a Two-dimensional Electron Gas in Magnetic Field// SPIN Vol. 13, No. 1 (2022) 2250002, World Scientific Publishing Company, DOI:10.1142/S2010324722500023