NAMANGAN DAVLAT UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI, [2026-6]
ISSN:2181-1458
ISSN:2181-0427

01.00.00-FIZIKA-MATEMATIKA
journal.namdu.uz
PHYSICS AND MATHEMATICS

150 GY Γ -NURLANISH BILAN NURLANYIRILGAN GEL-POLIMER ELEKTROLITLARNING ELEKTROFIZIK XOSSALARIGA TEMPERATURANI TA‘SIRI

Naimjonov Arslonbek Maxammadjon o`g`li
Namangan davlat universiteti doktoranti
ORCID: 0009-0001-8633-1091
E-mail: arslonbeknaimjonov@gmail.com
Abdukarimov Abdulaziz Abdubannayevich
Namangan davlat texnika universiteti dotsenti
ORCID: 0000-0003-2384-3249
E-mail: abdullaziz.abdukarimov@mail.ru
Abdulazizov Baxrom Toshmirza o`g`li
Namangan davlat universiteti professori
ORCID: 0000-0001-8653-4633
E-mail: bt_abdulazizov@mail.ru
Mamatkarimov Odiljon Oxundedayevich
Namangan davlat texnika universiteti professori
ORCID: 0009-0005-9501-6295
E-mail: odiljon_m63@mail.ru
Yunusov Anvar Xolmatovich
Mirzo Ulug`bek nomidagi O`zbekiston milliy universiteti professori
ORCID: 0009-0007-5240-6300
E-Mail: a.yunusov@nuu.uz

Annotatsiya. *Ushbu eksperimental tadqiqotda 150 Gy -nurlanish bilan ishlov berilgan DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell) quyosh elementi gel-polimer elektrolitining temperaturaga bog’liq elektrofizik xossalari elektrokimyoviy impedans spektroskopiyasi (EIS) metodi yordamida o’rganildi. O’lchovlar xona haroratidan gacha temperatura oralig’ida amalga oshirildi. Tadqiqot davomida temperatura ortishi bilan elektrolitning hajmiy qarshiligi kamayib, elektr o’tkazuvchanligi izchil oshib borishi aniqlandi. Eng yuqori elektrofizik ko’rsatkichlar da kuzatildi: hajmiy qarshilik gacha kamaydi, elektr o’tkazuvchanlik ga yetdi. Shu temperaturada zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi maksimal qiymatga, dielektrik singdiruvchanlik esa past chastota sohasida ga erishdi. Zaryad tashuvchilar harakatchanligi va diffuziya koeffitsiyenti temperatura ortishi bilan biroz pasayish tendensiyasini ko’rsatgan bo’lsa-da, konsentratsiyaning keskin ortishi elektr o’tkazuvchanlikning oshishida asosiy omil bo’lib xizmat qildi. Olingan natijalar -nurlanish bilan ishlov berilgan DSSC gel-polimer elektrolitlarining yuqori haroratlarda ham elektrofizik samaradorligini to’liq saqlab qolishini tasdiqlaydi.*

Kalit so‘zlar: *DSSC, quyosh elementi, gel-polimer elektrolit, -nurlanish, EIS, impedans spektroskopiyasi, elektr o’tkazuvchanlik, dielektrik singdiruvchanlik, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi, ion transporti, harakatchanlik, diffuziya koeffitsiyenti, temperatura ta’siri, PEO, redoks juftligi.*

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕЛЬ-ПОЛИМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ, ОБЛУЧЁННЫХ Γ-ИЗЛУЧЕНИЕМ ДОЗОЙ 150 ГР

Аннотация. *В данном экспериментальном исследовании методом электрохимической импедансной спектроскопии (EIS) были изучены температурно-зависимые электрофизические свойства гель-полимерного электролита солнечного элемента DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell), обработанного γ-излучением дозой 150 Гр. Измерения проводились в температурном интервале от комнатной температуры до 100 °C. В ходе исследования было установлено, что с повышением температуры объемное сопротивление электролита уменьшается, тогда как его электрическая проводимость последовательно возрастает. Наиболее высокие электрофизические показатели были зафиксированы при 100 °C: объемное сопротивление снизилось до Rb = 7.766 Ω, а электрическая проводимость достигла σ = 16.167 × 10⁻³*

См/см. При данной температуре концентрация носителей заряда достигла максимального значения n = 2.01 × 10²¹ см⁻³, а диэлектрическая проницаемость в низкочастотной области достигла εr = 28.723 × 10⁶. Несмотря на то, что подвижность носителей заряда μ и коэффициент диффузии D с повышением температуры проявили незначительную тенденцию к снижению, резкое увеличение концентрации носителей заряда стало основным фактором, способствующим росту электрической проводимости. Полученные результаты подтверждают, что гель-полимерные электролиты DSSC, обработанные γ-излучением, полностью сохраняют свою электрофизическую эффективность даже при повышенных температурах.

Ключевые слова: *DSSC, солнечный элемент, гель-полимерный электролит, γ-излучение, EIS, импедансная спектроскопия, электрическая проводимость, диэлектрическая проницаемость, концентрация носителей заряда, ионный транспорт, подвижность, коэффициент диффузии, влияние температуры, PEO, редокс-пара.*

THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF GEL-POLYMER ELECTROLYTES IRRADIATED WITH A 150 GY Γ-DOSE

Abstract. *In this experimental study, the temperature-dependent electrophysical properties of the gel-polymer electrolyte of a DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell) treated with 150 Gy γ-irradiation were investigated using the electrochemical impedance spectroscopy (EIS) method. The measurements were carried out in the temperature range from room temperature to 100 °C. During the study, it was found that with increasing temperature, the bulk resistance of the electrolyte decreased, while its electrical conductivity increased consistently. The highest electrophysical parameters were observed at 100 °C: the bulk resistance decreased to Rb = 7.766 Ω, and the electrical conductivity reached σ = 16.167 × 10⁻³ S/cm. At this temperature, the charge carrier concentration reached its maximum value of n = 2.01 × 10²¹ cm⁻³, while the dielectric permittivity in the low-frequency region reached εr = 28.723 × 10⁶. Although the charge carrier mobility μ and diffusion coefficient D showed a slight decreasing tendency with increasing temperature, the sharp increase in carrier concentration served as the main factor contributing to the enhancement of electrical conductivity. The obtained results confirm that γ-irradiated DSSC gel-polymer electrolytes fully retain their electrophysical efficiency even at elevated temperatures.*

Keywords: *DSSC, solar cell, gel-polymer electrolyte, γ-irradiation, EIS, impedance spectroscopy, electrical conductivity, dielectric permittivity, charge carrier concentration, ion transport, mobility, diffusion coefficient, temperature effect, PEO, redox couple.*

1. Kirish

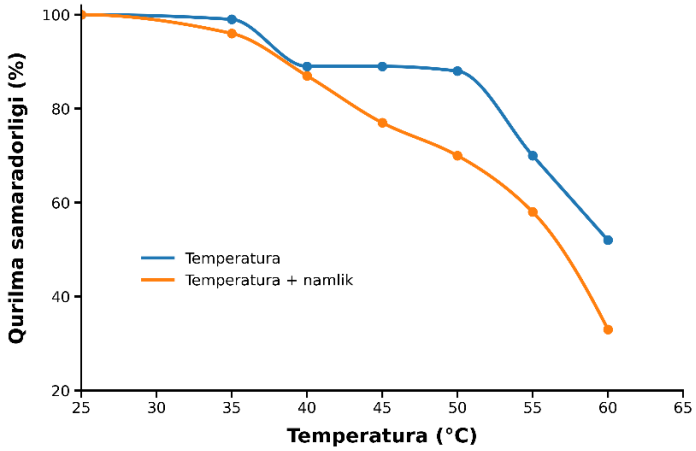
Quyosh energiyasidan foydalanish qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirishda muhim yo‘nalishlardan biri hisoblanadi. Bugungi kunda kremniy asosidagi quyosh elementlari yuqori samaradorligi bilan ajralib tursa-da, ularni ishlab chiqarish jarayonining murakkabligi, tannarxining yuqoriligi hamda ayrim ish sharoitlarida barqarorlik masalalari alternativ fotoelektrik tizimlarga bo‘lgan ilmiy qiziqishni kuchaytirmoqda. Shu jihatdan bo‘yoq bilan sezgirlashtirilgan quyosh elementlari, ya’ni DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell), arzon ishlab chiqarish imkoniyati, nisbatan oddiy tuzilishi, ekologik xavfsizligi va yarimo‘tkazgichli metall oksidlari bilan samarali ishlashi sababli istiqbolli uchinchi avlod quyosh elementlari qatoriga kiradi [1, 2].

DSSC elem entlarida TiO_2 keng taqiqlangan zona energiyasiga ega bo‘lgan n-tip yarimo‘tkazgichli metall oksidi sifatida fotoanod materiali vazifasini bajaradi. Uning asosiy funksiyasi bo‘yoq molekulalarida yorug‘lik ta’sirida hosil bo‘lgan elektronlarni qabul qilish va ularni tashqi elektr zanjiriga uzatishdan iborat. Biroq DSSC elementining umumiy ishlash samaradorligi faqat TiO_2 qatlamining xossalari bilan belgilanmaydi. Elektrolit qatlami ham zaryad tashish, redoks almashinuvi, ion transporti va ichki qarshilikni boshqaruvchi asosiy funksional komponentlardan biri hisoblanadi. Ayniqsa I^-/I_3^- redoks juftligiga ega gel-polimer elektrolit DSSC elementlarida bo‘yoq molekulalarini qayta tiklash, ionlarning harakatlanishini ta’minlash hamda TiO_2/bo‘yoq/elektrolit chegarasidagi elektrokimyoviy jarayonlarda muhim rol o‘ynaydi [3,4].

Gel-polimer elektrolitning elektr o'tkazuvchanligi, hajmiy qarshiligi, dielektrik singdiruvchanligi, impedans xarakteristikalari hamda zaryad tashish parametrlari DSSC tizimining elektrofizik holatini baholashda muhim ahamiyatga ega. Elektrolitdagi ionlarning harakatchanligi μ, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi n va diffuziya koeffitsiyenti D zaryad almashinuvi va rekombinatsiya jarayonlariga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Agar elektrolitning ichki qarshiligi ortsa yoki ion transporti susaysa, bu zaryadlarning qayta birikish ehtimolini oshirishi va quyosh elementining fotoelektrik parametrlariga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Shu sababli elektrolit komponentining tashqi fizik omillar, xususan temperatura ta'sirida qanday o'zgarishini o'rganish DSSC elementlarining ishlash mexanizmini chuqurroq tushunish uchun muhimdir.

DSSC elementlarining ishlash samaradorligi tashqi muhit omillariga, xususan temperatura va namlik ta’siriga sezgir hisoblanadi. Temperatura ortishi elektrolitning ion transporti, qutblanish jarayonlari va ichki qarshiligiga ta’sir

ko‘rsatishi mumkin. Shu bilan birga, temperatura namlik bilan birgalikda ta’sir qilganda qurilma ishlash ko‘rsatkichining yanada tezroq pasayishi kuzatiladi. Bu holat DSSC tarkibidagi elektrolit, bo‘yoq molekulalari va elektrod–elektrolit chegarasidagi elektrokimyoviy jarayonlarning tashqi sharoitlarga bog‘liqligini ko‘rsatadi. 1-rasmda DSSC qurilmasi ishlash ko‘rsatkichining temperatura hamda temperatura va namlik birgalikdagi ta’siri ostida o‘zgarishi keltirilgan [5].



1-rasm. DSSC qurilmasi ishlash ko‘rsatkichining temperatura hamda temperatura va namlik birgalikdagi ta’sirida o‘zgarishi [5].

Elektrolitning transport va qutblanish xossalari temperaturaga sezgir bo‘lib, temperatura ortishi polimer zanjirlarining segmental harakati, ionlarning harakatchanligi va zaryad tashish jarayonlariga ta’sir qilishi mumkin. Bunday o‘zgarishlarni baholashda elektrokimyoviy impedans spektroskopiyasi, ya’ni EIS metodi samarali usullardan biri hisoblanadi. EIS orqali elektrolitning hajmiy qarshiligi, elektr o‘tkazuvchanligi, dielektrik singdiruvchanligi, zaryad tashuvchilar harakatchanligi, konsentratsiyasi va diffuziya koeffitsiyenti kabi asosiy elektrofizik kattaliklarni aniqlash mumkin.

Avvalgi tadqiqot natijalarida DSSC elementlarida qo'llaniladigan I^-/I_3^-redoks juftligiga ega gel-polimer elektrolit uchun 150 Gy γ-nurlanish dozasi ion transporti va elektr o'tkazuvchanlik nuqtayi nazaridan eng qulay radiatsion ishlov sharoiti sifatida aniqlangan edi. Shu bois, ushbu maqolada aynan 150 Gy γ-nurlanish bilan ishlov berilgan gel-polimer elektrolitning temperaturaga bog'liq elektrofizik xossalari eksperimental ravishda tadqiq etildi. Tadqiqotda turli temperatura sharoitlarida elektrolitning impedans spektrlari, hajmiy qarshiligi, elektr o'tkazuvchanligi, dielektrik singdiruvchanligi, zaryad tashuvchilar harakatchanligi μ, konsentratsiyasi n va diffuziya koeffitsiyenti D tahlil qilindi. Olingan natijalar 150 Gy γ-nurlanish bilan ishlov berilgan gel-polimer elektrolitning temperatura ta’siridagi ion transport mexanizmini va elektrofizik parametrlarining o‘zgarish xususiyatlarini baholashga xizmat qiladi.

2. Eksperimental metodlar

2.1. Foydalanilgan materiallar

Ushbu tadqiqotda DSSC elementlarida ishlatiladigan I^-/I_3^- redoks juftligiga ega gel-polimer elektrolit tayyorlandi. Elektrolit tarkibini shakllantirishda polimer matritsa, erituvchi, plastifikatorlar hamda iodid asosidagi redoks komponentlardan foydalanildi. Gel-polimer asos sifatida polyethylene oxide — PEO tanlandi. PEO elektrolit tarkibida ionlar harakati uchun polimer muhit hosil qiladi, komponentlarning bir tekis taqsimlanishiga yordam beradi hamda elektrolitning mexanik barqarorligini ta’minlaydi. PEO ni eritish uchun N,N-dimethylformamide — DMF erituvchi sifatida qo‘llanildi. Dastlab PEO DMF muhitida eritilib, bir jinsli polimer eritma hosil qilindi. Gel-polimer elektrolitning ion o‘tkazuvchanligini yaxshilash, polimer zanjirlarining segmental harakatini kuchaytirish va elektrolitning elastikligini oshirish maqsadida tarkibga ethylene carbonate — EC hamda propylene carbonate — PC plastifikatorlari qo‘shildi. Ushbu plastifikatorlar elektrolit ichida ionlarning harakatlanishini yengillashtiradi va zaryad tashish jarayonlariga qulay muhit yaratadi.



2-rasm. Elektrolit tayyorlashda foydalanilgan kimyoviy reaktivlar: PEO, DMF, EC, PC, TPAI va I_2.

DSSC elementlari uchun zarur bo‘lgan iodid/triiodid redoks muhitini hosil qilish maqsadida elektrolit tarkibiga tetra-propylammonium iodide — TPAI va yod kristali — I_2 kiritildi. TPAI I^- ionlari manbai sifatida xizmat qiladi, I_2 esa I^-/I_3^- redoks juftligining shakllanishida ishtirok etadi. Mazkur redoks juftlik DSSC elementlarida ion almashinuvi, zaryad tashish va oksidlangan bo‘yoq molekulalarining qayta tiklanish jarayonlarida muhim rol o‘ynaydi.

Elektrolit tayyorlashda ishlatilgan kimyoviy reaktivlar 2-rasmda ko‘rsatilgan, ularning miqdori va vazifalari esa 1-jadvalda keltirilgan. Barcha kimyoviy moddalar Sigma-Aldrich firmasi mahsulotlari bo‘lib, tajribada qo‘shimcha tozalashsiz ishlatildi.

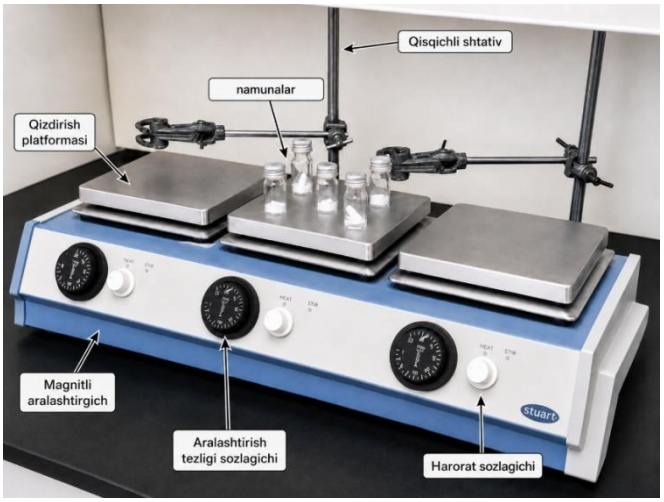
1-jadval

Gel-polimer elektrolit tayyorlashda foydalanilgan materiallar

Material	Belgilanishi	Miqdori	Vazifasi
Polyethylene oxide	PEO	0.1 g	Polimer matritsa hosil qilish
N,N-dimethylformamide	DMF	1 ml	Erituvchi
Ethylene carbonate	EC	0.25 g	Plastifikator
Propylene carbonate	PC	0.25 ml	Plastifikator
Tetra-propylammonium iodide	TPAI	0.2 g	I^- ionlari manbai
Yod	I_2	0.02 g	I^-/I_3^-redoks juftligini hosil qilish

2.2 Gel-polimer elektrolitni tayyorlash texnologiyasi

Gel-polimer elektrolit namunalarini tayyorlash belgilangan ketma-ketlik asosida amalga oshirildi. Avvalo, tajribada ishlatiladigan PEO, EC, PC, TPAI va I_2 moddalari analitik tarozi yordamida kerakli miqdorda o‘lchab olindi. Elektrolitning polimer asosini hosil qilish uchun PEO polimeri DMF erituvchisida eritildi. Eritmaning bir jinsli holatga kelishini ta’minlash maqsadida aralashma magnit aralashtirgich yordamida 80 °C haroratda aralashtirildi. Gel-polimer elektrolit komponentlarini magnit aralashtirgich yordamida bir jinsli holatga keltirish jarayoni 3-rasmda ko‘rsatilgan.



3-rasm. Gel-polimer elektrolit komponentlarini magnit aralashtirgich yordamida bir jinsli holatga keltirish jarayoni.

Keyingi bosqichda hosil bo‘lgan PEO/DMF eritmasiga ethylene carbonate (EC) va propylene carbonate (PC) plastifikatorlari qo‘shildi. Ushbu plastifikatorlar polimer zanjirlarining segmental harakatini faollashtirish, elektrolitning elastikligini oshirish hamda ion transporti uchun qulay muhit yaratish vazifasini bajaradi. EC va PC qo‘shilgandan so‘ng aralashma 60 °C haroratda 50 daqiqa davomida magnit aralashtirgichda aralashtirildi. So‘ngra aralashmaga tetra-propylammonium iodide (TPAI) qo‘shildi. TPAI gel-polimer elektrolit tarkibida I^- ionlari manbai sifatida xizmat qiladi. TPAI qo‘shilgandan keyin aralashma 60 °C haroratda 1 soat davomida aralashtirilib, iodid ionlarining polimer-plastifikator muhitida bir tekis taqsimlanishi ta’minlandi.

Oxirgi bosqichda elektrolit tarkibiga yod kristali (I_2) kiritildi. I_2 ning qo‘shilishi I^-/I_3^- redoks juftligini shakllantirish uchun zarur hisoblanadi. Yod qo‘shilgandan so‘ng aralashma xona haroratida 1 soat davomida aralashtirildi. Natijada DSSC elementlarida qo‘llanilishi mumkin bo‘lgan I^-/I_3^- redoks juftligiga ega gel-polimer elektrolit hosil qilindi. Tayyor elektrolit shisha idishda saqlandi va barqaror holatga kelishi uchun bir kun davomida qoldirildi. EIS o‘lchovlarini bajarishdan oldin gel-polimer elektrolit tanga shaklidagi metall elektrodlar orasiga joylashtirildi. O‘lchov uchun tayyorlangan gel-polimer elektrolit namunasi 4-rasmda keltirilgan.



4-rasm. EIS o'Ichovlari uchun elekterolit namunalari.

2.3. 150 Gy γ-nurlantirish va temperaturaga bog`liq EIS o`lchovlari

Avvalgi tadqiqot natijalariga ko'ra, DSSC elementlarida qo'llaniladigan elektrolit uchun 150 Gy γ-nurlanish dozasi elektr o'tkazuvchanlik va ion transporti nuqtayi nazaridan optimal radiatsion ishlov sharoiti sifatida baholangan. Shu sababli mazkur ishda aynan 150 Gy γ-nurlanish bilan ishlov berilgan gel-polimer elektrolitning temperaturaga bog'liq elektrofizik xossalari o'rganildi.

Gamma fotonlar modda bilan energiya almashishda asosan uchta mexanizm orqali ta'sirlashadi: fotoelektrik yutilish ($E_\gamma \lesssim 0.1\text{MeV}$), Kompton sochilishi ($0.1\text{MeV} \lesssim E_\gamma \lesssim 10\text{MeV}$) va juftlik hosil bo'lishi $\left(E_\gamma \gtrsim 1.022\text{MeV}\right)$ [6]. ^{60}Co gamma manbai energiya sohasida polimer va organik komponentlardan tashkil topgan gel-polimer elektrolitda energiya almashinuvida asosan Kompton sochilishi muhim rol o‘ynaydi. Ushbu ishda γ-nurlanish dozasi o‘zgarmas holda, ya’ni 150 Gy qiymatda saqlanib, asosiy o‘zgaruvchi sifatida temperatura tanlandi. Polimer yoki organik muhitda γ-nurlanish ta'sirida hosil bo'ladigan radikallar konsentratsiyasining vaqt bo'yicha o'zgarishi soddalashtirilgan kinetik model orqali quyidagicha ifodalanishi mumkin [7]:

$$\frac{dR}{dt} = G\dot{D} - k_t R^2 - k_{O_2}[O_2]R \qquad (1)$$

bu yerda R - radikal konsentratsiyasi, $\dot{D}$ - doza quvvati, G - radikal hosil bo'lish koeffitsiyenti, k_t radikallarning rekombinatsiya tezligi konstantasi, k_{O_2} - kislorod bilan reaksiyaga kirishish tezligi konstantasi. Ushbu model γ-nurlanish ta'sirida polimer muhitda yuzaga keladigan radikal hosil bo'lishi, rekombinatsiya va oksidlanish jarayonlarini sifat jihatdan izohlash imkonini beradi. Tayyorlangan gel-polimer elektrolit namunasi ^{60}Co gamma manbaiga ega Gammacell 220 Nordion International Inc. qurilmasida 150 Gy dozada nurlantirildi. γ-nurlantirish jarayoni Malaya Universiteti huzuridagi Centre for Ionics laboratoriyasida amalga oshirildi. Nurlantirishdan so'ng namuna bir kun davomida saqlandi va keyingi bosqichda EIS o'lchovlariga tayyorlandi.



5-rasm. Elektrolit namunasini Gammacell 220 Nordion International Inc. qurilmasida 150 Gy dozali $^{60}Co\gamma$-nurlanish bilan radiatsion ishlov berish jarayoni.

EIS o`lchovlari IMPEDANCE ANALYZER IM3570 Hioki qurilmasida bajarildi. Nurlantirilgan gel-polimer elektrolit coin-cell tipidagi metall elektrodlar orasiga joylashtirildi. O'lchovlar dastlab xona xaroratida, so'ngra 40, 50, 60, 70, 80, 90 va 100°C temperaturalarda amalga oshirildi. Har bir temperatura qiymatida o`lchovlar uch martadan takrorlandi va tahlilda barqaror qiymat sifatida ikkinchi o'lchov natijalaridan foydalanildi. Chastota oralig'i avvalgi tajribadagi kabi 50 Hz dan 4.5 MHz gacha bo'lgan diapazonda tanlandi.



6-rasm. 150 Gy γ-nurlanish bilan ishlov berilgan gel-polimer elektrolit parametrlarini turli temperaturalarda EIS metodi yordamida o`lchash jarayoni.

Olingan impedans natijalari asosida elektrolitning umumiy impedansi quyidagicha hisoblandi:

$$|Z| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad (2)$$

bu yerda Z' va Z'' mos ravishda impedansning haqiqiy va mavhum qismlaridir.

Elektr o'tkazuvchanlik hajmiy qarshilik orqali quyidagi ifoda bilan aniqlandi:

$$\sigma = \frac{l}{R_b S} \quad (3)$$

bu yerda l - elektrodlar orasidagi masofa, S - elektrod yuzasi, R_b - gel-polimer elektrolitning hajmiy qarshiligi.

EIS natijalari asosida zaryad tashish parametrlarini aniqlash uchun quyidagi ifodalardan foydalanildi [8]:

$$D = \frac{(k\varepsilon_r\varepsilon_0 S)^2}{\tau} \quad (4)$$

$$\mu = \frac{eD}{k_B T} \quad (5)$$

$$\sigma = n\mu e \quad (6)$$

$$n = \frac{\sigma k_B T \tau}{e^2 (k\varepsilon_r\varepsilon_0 S)^2} \quad (7)$$

bu yerda D - diffuziya koeffitsiyenti, μ - zaryad tashuvchilar harakatchanligi, n - zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi, e - elementar zaryad, k_B - Boltsman doimiysi, T - absolyut temperatura, τ relaksatsiya vaqti, k - fittingdan aniqlanadigan koeffitsiyent ($k = 1/C$), ε_r - dielektrik singdiruvchanlik, ε_0 - vakuum dielektrik doimiysi.

Dielektrik singdiruvchanlik EIS natijalaridan quyidagi formula orqali hisoblandi:

$$\varepsilon_r = \frac{A_i}{\omega C_0} \quad (8)$$

bu yerda A_i - admittansning mavhum qismi, $\omega = 2\pi f$ - burchak chastota, C_0 - geometrik sig'im.

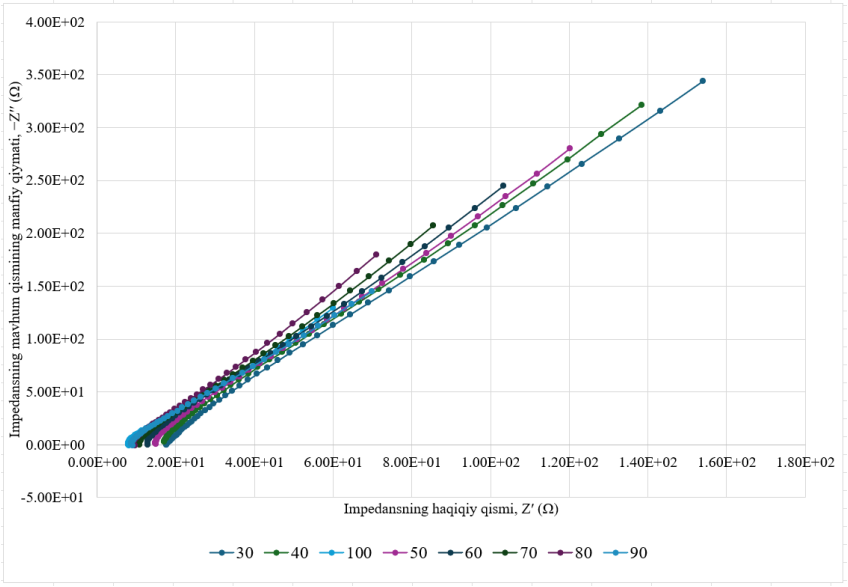
$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{l} \quad (9)$$

bu yerda l - elektrodlar orasidagi masofa. Ushbu hisoblashlar asosida 150 Gy γ-nurlanish bilan ishlov berilgan gel-polimer elektrolitning temperaturaga bog'liq impedans spektri, elektr o'tkazuvchanligi, hajmiy qarshiligi, dielektrik singdiruvchanligi hamda zaryad tashish parametrlaridagi o'zgarishlar tahlil qilindi.

3. Natijalar va muhokama

3.1. Temperaturaga bog‘liq impedans spektri tahlili

Namuna elektrolitining temperaturaga bog'liq impedans spektrlari xona xarorati, $40-100°C$ holatlari uchun tahlil qilindi 7-rasm. Grafikda impedansning haqiqiy qismi Z' va mavhum qismining manfiy qiymati $-Z''$ o'rtasidagi bog'lanish tasvirlanadi.



7-rasm. 150 Gy γ-nurlanish bilan ishlov berilgan elektrolitning xona xaroratidan 100 °C temperaturagacha holatlaridagi Nyquist impedans spektrlari.

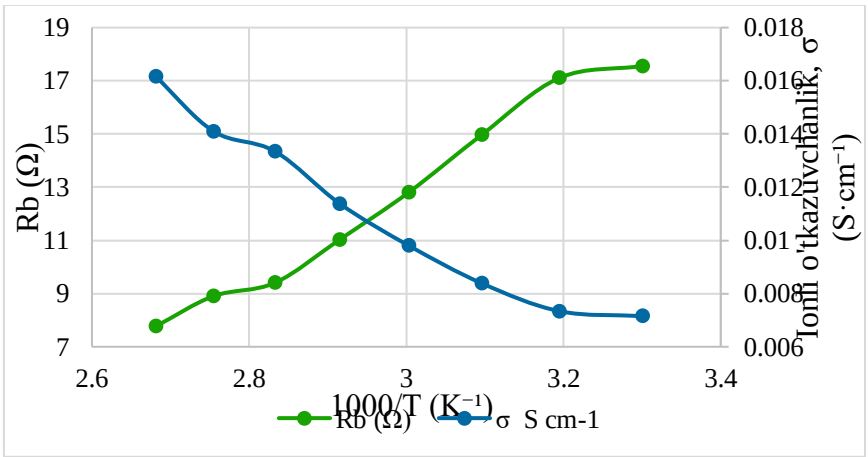
Nyquist spektrlaridan ko'rinadiki, temperatura ortishi bilan impedans qiymatlari muntazam kamayib boradi. Past chastota sohasida xona xaroratida umumiy impedans eng katta qiymatga ega bo'lib, 50 Hz atrofida $|Z| \approx 384.9\Omega, -Z'' \approx 352.5\Omega$ ni tashkil etdi. Bu xona haroratida ion transporti nisbatan sustroq va elektrod-elektrolit chegarasidagi qutblanish kuchliroq ekanini ko'rsatadi.

Temperatura $40°C$ dan $100°C$ gacha oshirilganda impedans spektrlari past qiymatlar tomon siljidi. Eng kichik impedans $100°C$ da kuzatildi: 50 Hz atrofida $|Z| \approx 142.5\Omega, -Z'' \approx 129.3\Omega$ bo'ldi. Bu $100°C$ da polimer zanjirlarining segmental harakati kuchayib, ionlarning harakatlanishi uchun qulayroq muhit hosil bo'lganini bildiradi. Shuning uchun impedans spektri bo'yicha eng yaxshi elektrofizik holat $100°C$ da kuzatildi.

Xona xaroratida 50 Hz atrofida $|Z| \approx 376.6\Omega, -Z'' \approx 343.6\Omega$,. Nyquist spektrlarining umumiy siljishi va past chastota sohasidagi qiymatlar temperatura ortishi bilan impedans kamayishini ko'rsatdi. Keyingi bosqichda temperatura $40°C$ dan $100°C$ gacha oshirilganda impedans qiymatlari muntazam pasayib bordi lekin qonuniyat saqlanganini ko'rishimiz mumkin. Bundan ko'rinadiki DSSC elektrolitlari 100 gacha o'z holatini yo'qotmaydi va quyosh elementi yuqori haroratlarda ham samaradorlioigini saqlaydi.

3.2. Elektr o'tkazuvchanlik va hajmiy qarshilikning temperaturaga bog'liq o'zgarishi

Elektrolitning elektr o'tkazuvchanligi σ va hajmiy qarshiligi R_b temperaturaga bog'liq holda o`zgarishi 8-rasmda keltirilgan.



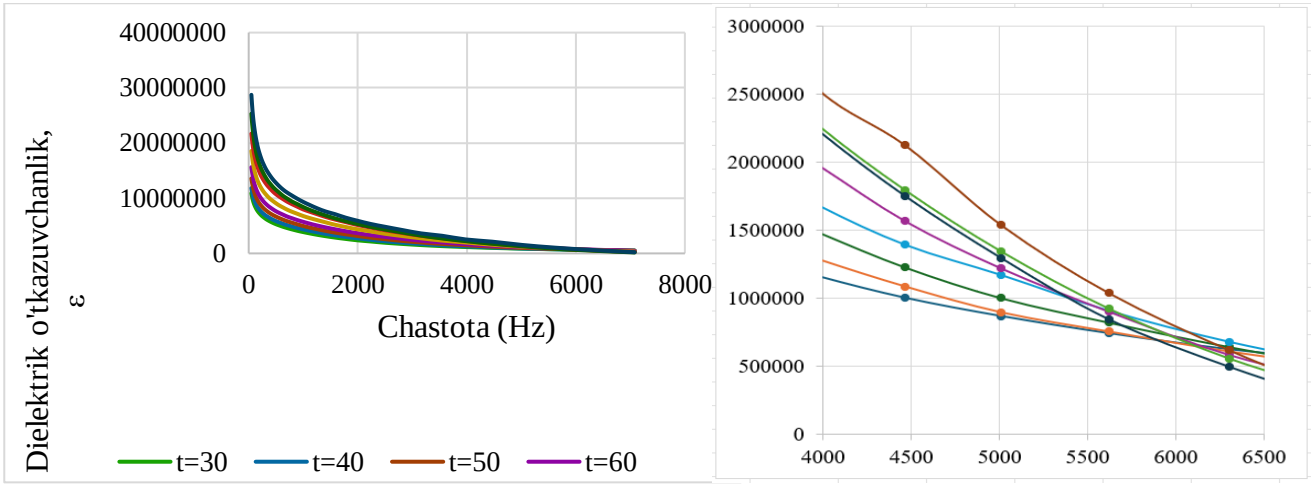
8-rasm. Namuna elektrolitining temperaturaga bog'liq elektr o'tkazuvchanligi va hajmiy qarshiligi R_b ning o'zgarishi.

Natijalarga ko'ra, xona xaroratida hajmiy qarshilik $R_b = 17.55343\Omega$, elektr o'tkazuvchanlik $\sigma = 7.152 \times 10^{-3}$ S/cm ni tashkil etdi. Bu xona haroratidagi dastlabki o'lchovlarning barqarorligini ko'rsatadi. Temperatura ortishi bilan R_b

muntazam kamayib, σ esa ortib bordi. 40°C da $R_b = 17.10997\Omega, \sigma = 7.338 \times 10^{-3}$ S/cm bo'lgan bo'lsa, 80°C da $R_b = 9.40673\Omega$ gacha kamayib, $\sigma = 13.347 \times 10^{-3}$ S/cm gacha oshdi. Eng yaxshi natija 100°C temperaturada kuzatildi. Bu holatda hajmiy qarshilik eng kichik qiymatga, ya'ni $R_b = 7.766096\Omega$ ga kamaydi, elektr o'tkazuvchanlik esa maksimal qiymatga, $\sigma = 16.167 \times 10^{-3}$ S/cm ga yetdi. Bu temperatura ortishi bilan polimer zanjirlarining segmental harakati kuchayishi va ion transporti uchun qulay sharoit hosil bo'lishi bilan izohlanadi.

3.3. Dielektrik singdiruvchanlikning temperatura va chastotaga bog'liq o'zgarishi

Effektiv dielektrik singdiruvchanligi ε_r chastotaga bog'liq holda berilgan haroratlar uchun solishtirildi 9-rasm.



9-rasm. Dielektrik singdiruvchanligining temperatura va chastotaga bog'liq o'zgarishi.

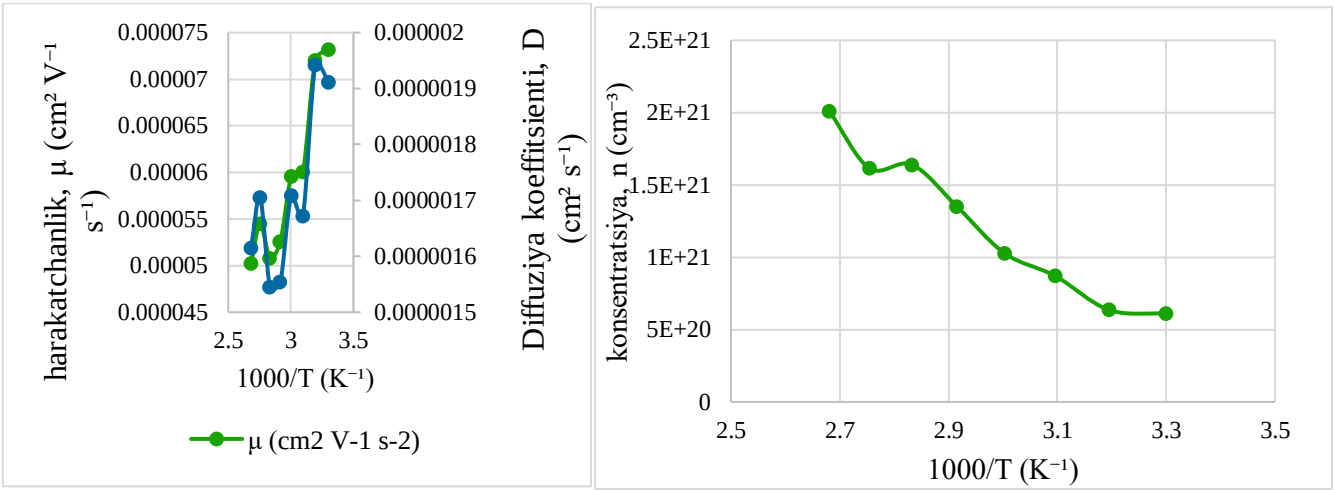
Natijalarga ko'ra, barcha temperatura qiymatlarida dielektrik singdiruvchanlik chastota ortishi bilan kamayib bordi. Past chastota sohasida, ya'ni 50 Hz atrofida, ε_r qiymatlari nisbatan yuqori bo'lib, xona xaroratida $\varepsilon_r = 10.907 \times 10^6$. Temperatura ortishi bilan ε_r qiymati oshib bordi va eng katta qiymat 100°C da kuzatildi. Bu temperaturada 50 Hz atrofida $\varepsilon_r = 28.723 \times 10^6$ ga yetdi.

Temperatura oshishi bilan effektiv dielektrik singdiruvchanlikning ortishi polimer zanjirlarining segmental harakati kuchayishi, ion va dipol qutblanishining faollashishi hamda elektrod–elektrolit chegarasida zaryad to‘planish jarayonlarining kuchayishi bilan izohlanadi. Ayniqsa past chastota sohasida ionlar va dipollar tashqi elektr maydon o'zgarishiga yetarlicha moslasha oladi, shu sababli qutblanish jarayoni kuchli namoyon bo'ladi.

Chastota oshgan sari ε_r qiymatlari keskin kamaydi. Masalan, 100°C da ε_r 50 Hz atrofida 28.723×10^6 bo`lgan bo'lsa, 7079 Hz atrofida 0.210×10^6 gacha kamaydi. Bu yuqori chastotalarda ion va dipol qutblanishining ulushi kamayishi bilan bog'liq. Ya'ni elektr maydon tez o'zgarganda ionlar va dipollar maydon yo'nalishiga to'liq moslashishga ulgurmaydi, natijada dielektrik singdiruvchanlik pasayadi. Demak, dielektrik singdiruvchanlik bo'yicha eng yuqori qiymat past chastota va 100°C temperaturada kuzatildi. Eng past qiymatlar esa yuqori chastota sohasida qayd etildi. Umuman olganda, temperatura ortishi gel-polimer elektrolitda qutblanish jarayonlarini kuchaytiradi, chastota ortishi esa ε_r qiymatining kamayishiga olib keladi.

3.4. Zaryad tashish parametrlarining temperaturaga bog'liq o'zgarishi

Elektrolitda zaryad tashish parametrlarining temperaturaga bog'liq o'zgarishi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi n, harakatchanlik μ va diffuziya koeffitsiyenti D asosida o`rganildi 10-rasm.



10-rasm. Elektrolitda zaryad tashish parametrlarining temperaturaga bog'liq o'zgarishi.

Natijalarga ko'ra, xona xaroratida $n = 6.10 \times 10^{20}\ \mathrm{cm}^{-3}, \mu = 7.32 \times 10^{-5}\ \mathrm{cm}^2\ \mathrm{V}^{-1}\ \mathrm{s}^{-1}, D = 1.91 \times 10^{-6}\ \mathrm{cm}^2\ \mathrm{s}^{-1}$ bo'ldi. Temperatura ortishi bilan zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi sezilarli ravishda ortib bordi. $40°\mathrm{C}$ da $n = 6.36 \times 10^{20}\ \mathrm{cm}^{-3}$ bo'Igan bo'Isa, $80°\mathrm{C}$ da $n = 1.64 \times 10^{21}\ \mathrm{cm}^{-3}$ ga yetdi. Eng yuqori konsentratsiya $100°\mathrm{C}$ da kuzatilib, $n = 2.01 \times 10^{21}\ \mathrm{cm}^{-3}$ ni tashkil etdi. Bu yuqori temperaturada ion dissotsiatsiyasi va erkin zaryad tashuvchilar soni ortganini ko'rsatadi.

Harakatchanlik μ va diffuziya koeffitsiyenti D esa temperatura ortishi bilan umumiy pasayish tendensiyasini ko'rsatdi. μ ning eng katta qiymati xona xaroratida $\mu = 7.92 \times 10^{-5}\ \mathrm{cm}^2\ \mathrm{V}^{-1}\ \mathrm{s}^{-1}$, eng kichik qiymati esa $100°\mathrm{C}$ da $\mu = 5.02 \times 10^{-5}\ \mathrm{cm}^2\ \mathrm{V}^{-1}\ \mathrm{s}^{-1}$ bo'ldi. Diffuziya koeffitsiyenti ham xona xaroratida maksimal qiymatga, ya'ni $D = 2.07 \times 10^{-6}\ \mathrm{cm}^2\ \mathrm{s}^{-1}$ ga ega bo'lib, yuqori temperaturalarda nisbatan kichikroq qiymatlarda kuzatildi.

Demak, temperatura ortishi bilan gel-polimer elektrolitda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi keskin ortadi, harakatchanlik μ va diffuziya koeffitsiyenti D esa biroz kamayish tendensiyasini ko'rsatadi. Shunga qaramay, $100°\mathrm{C}$ da n ning maksimal qiymatga yetishi elektr o'tkazuvchanlikning ortishida asosiy omil bo'lib xizmat qildi. Shu sababli zaryad tashish parametrlarini umumiy baholaganda, o'rganilgan temperatura oralig'ida eng samarali elektrofizik holat $100°\mathrm{C}$ da kuzatildi.

XULOSA

Ushbu tadqiqotda 150 Gy γ-nurlanish bilan ishlov berilgan DSSC gel-polimer elektrolitining temperaturaga bog'liq elektrofizik xossalari EIS metodi yordamida xona haroratidan $100°\mathrm{C}$ gacha bo'lgan oraliqda o'rganildi.

Olingan natijalar shuni ko'rsatdiki, temperatura ortishi bilan elektrolitning hajmiy qarshiligi kamayib, elektr o'tkazuvchanligi izchil oshib bordi. $100°\mathrm{C}$ da eng yuqori elektrofizik ko'rsatkichlar qayd etildi: hajmiy qarshilik $R_b = 7.766\Omega$ gacha kamaydi, elektr o'tkazuvchanlik $\sigma = 16.167 \times 10^{-3}\mathrm{S/cm}$ ga yetdi, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi esa $\mathrm{n} = 2.01 \times 10^{21}\ \mathrm{cm}^{-3}$ maksimal qiymatga erishdi. Dielektrik singdiruvchanlik ham past chastota sohasida $100°\mathrm{C}$ da eng yuqori qiymatni - $\varepsilon_r = 28.723 \times 10°$ ni ko'rsatdi.

Tadqiqot natijalariga ko'ra, DSSC elektrolitlari yuqori haroratlarda ham o'z elektrofizik samaradorligini to'liq saqlab qoladi, ya`ni, ion transporti va zaryad tashish jarayonlari harorat oshishi bilan yanada faollashadi. Bu esa γ-nurlanish bilan ishlov berilgan gelpolimer elektrolitlarning real ish sharoitlarida - jumladan, quyosh nuri ta'sirida qizib ketgan muhitda ham-DSSC quyosh elementlarida ishonchli va barqaror ishlashi uchun yaroqli ekanligini tasdiqlaydi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. O'Regan B., Grätzel M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films. Nature. 1991;353:737-740. DOI: 10.1038/353737a0.

2. Hagfeldt A., Boschloo G., Sun L., Kloo L., Pettersson H. Dye-Sensitized Solar Cells. Chemical Reviews. 2010;110(11):6595-6663. DOI: 10.1021/cr900356p.

3. Grätzel M. Photoelectrochemical cells. Nature. 2001;414:338-344. DOI: 10.1038/35104607.

4. Boschloo G., Hagfeldt A. Characteristics of the lodide/Triiodide Redox Mediator in Dye-Sensitized Solar Cells. Accounts of Chemical Research. 2009;42(11):1819-1826. DOI: 10.1021/ar900138m.

5. Tomar N., Dhaka V. S., Surolia P. K. Testing the performance of dye sensitized solar cells under various temperature and humidity environments // Journal of Applied Electrochemistry. 2024. Vol. 54. P. 573–580. DOI: 10.1007/s10800-023-01983-z.

6. Berger M. J., Hubbell J. H., Seltzer S. M., Chang J., Coursey J. S., Sukumar R., Zucker D. S., Olsen K. XCOM Photon Cross Sections Database. NIST Standard Reference Database 8 (XGAM), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2010. DOI: 10.18434/T48G6X

7. Spadaro G., Alessi S., Dispenza C. Ionizing radiation-induced crosslinking and degradation of polymers // Applications of Ionizing Radiation in Materials Processing. Warsaw: Institute of Nuclear Chemistry and Technology, 2017. P. 167–182.

8. Arof A. K., Amirudin S., Yusof S. Z., Noor I. M. A method based on impedance spectroscopy to determine transport properties of polymer electrolytes. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2014, Vol. 16, pp. 1856–1867. DOI: 10.1039/C3CP53830C.