

GRAFEN OKSIDI TARKIBLI SUPERKONDENSATOR UCHUN ELEKTROD

Xurramova Aziza Sayriddin Qizi

Termiz davlat unversiteti talabasi

E-mail: [azizaxurramova096@gmail.com](mailto:azizaxurramova096@gmail.com)

MAQOLA  
MALUMOTI

ANNOTATSIYA:

MAQOLA TARIXI:

Received: 05.06.2026

Revised: 06.06.2026

Accepted: 07.06.2026

KALIT SO'ZLAR:

Grafen, grafen oksidi, qaytarilgan grafen oksidi, superkondensator, elektrod, energiya saqlash, nanomaterial, elektrokimyo

Ushbu maqolada grafen va uning hosilalari asosida tayyorlangan superkondensator elektrodleri, ularning tuzilishi, fizik-kimyoviy xossalari hamda energiya saqlash tizimlaridagi qo'llanilishi o'rganilgan. Superkondensatorlar yuqori quvvat zichligi, tez zaryadlanish va uzoq xizmat muddati bilan ajralib turadi. Tadqiqotda grafen oksidini qaytarish orqali olingan rGO materialining elektrokimyoviy xossalari tahlil qilindi. Natijalar grafen asosidagi elektrodlar yuqori sirt maydoni va elektr o'tkazuvchanligi tufayli yuqori sig'im va barqaror ishlashni ta'minlashini ko'rsatdi.

KIRISH

So'nggi yillarda energiyani samarali saqlash texnologiyalarini rivojlantirish global miqyosda dolzarb ilmiy va texnologik muammolardan biri hisoblanadi. Qayta tiklanuvchi energiya manbalari - quyosh va shamol energiyasining keng qo'llanilishi energiyani saqlashning samarali, tezkor va uzoq muddatli tizimlarini talab etmoqda. Shu nuqtai nazardan, yuqori quvvat zichligi va tez zaryadlanish xususiyatiga ega energiya saqlash qurilmalari muhim ahamiyat kasb etadi. An'anaviy energiya saqlash qurilmalari, xususan, akkumulyatorlar yuqori energiya zichligiga ega bo'lishiga qaramay, ularning zaryadlanish tezligi past, xizmat muddati esa cheklangan. Bunga qarama-qarshi ravishda, superkondensatorlar yuqori quvvat zichligi, qisqa vaqt ichida zaryadlanish imkoniyati va millionlab sikllarga bardoshlilik bilan ajralib turadi. Shu sababli, superkondensatorlar transport vositalari, portativ elektron qurilmalar va qayta tiklanuvchi energiya tizimlarida keng qo'llanilmoqda. Superkondensatorlarning samaradorligi asosan elektrod materialining fizik-kimyoviy xossalari bog'liq bo'lib, yuqori sirt maydoni, elektr o'tkazuvchanligi va ionlarning tez diffuziyasini ta'minlovchi tuzilma talab etiladi. Shu jihatdan, nanomateriallar, ayniqsa uglerod asosidagi materiallar — aktiv uglerod, uglerod nanotubalari va grafen —

keng o'rganilmoqda. Grafen ikki o'lchamli,  $sp^2$ -gibridlangan uglerod atomlaridan tashkil topgan kristall panjarali material bo'lib, u o'zining noyob xossalari bilan ajralib turadi. Grafenning nazariy sirt maydoni  $2600 \text{ m}^2/\text{g}$  dan ortiq bo'lib, bu ko'rsatkich uni elektrodalarda zaryad to'planishini maksimal darajada oshiruvchi materialga aylantiradi. Bundan tashqari, grafen yuqori elektr o'tkazuvchanligi, mexanik mustahkamligi va kimyoviy barqarorligi bilan tavsiflanadi. Grafenning oksidlangan shakli — grafen oksidi (GO) hamda uning qaytarilgan shakli — rGO superkondensator elektrodleri sifatida keng qo'llaniladi. GO tarkibida kislorodli funksional guruhlar mavjudligi uni dispersiyalashni osonlashtiradi, rGO esa yuqori elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lib, elektrokimyoviy jarayonlarda faol ishtirok etadi. Shu sababli, GO dan rGO olish va uni elektrod material sifatida qo'llash bugungi kunda muhim ilmiy yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Shu bilan birga, grafen asosidagi materiallarda qatlamlarning aglomeratsiyasi, ya'ni bir-biriga yopishib qolishi natijasida faol sirt maydonining kamayishi kuzatiladi. Bu esa superkondensatorlarning sig'imi va samaradorligiga salbiy ta'sir ko'rsatadi. Ushbu muammoni bartaraf etish uchun grafenni metall oksidlar, o'tkazuvchan polimerlar va boshqa nanomateriallar bilan kompozitlash usullari keng qo'llanilmoqda. Mazkur tadqiqot ishida grafen va uning hosilalari asosida tayyorlangan superkondensator elektrodleri, ularning tuzilishi, fizik-kimyoviy xossalari hamda elektrokimyoviy samaradorligi chuqur tahlil qilinadi. Shuningdek, mavjud muammolar va ularni bartaraf etish yo'llari ilmiy asosda yoritiladi.

### ASOSIY QISM

Superkondensatorlar elektrokimyoviy energiya saqlash qurilmalari bo'lib, ular energiyani ikki asosiy mexanizm orqali jamlaydi: elektr ikki qatlam (Electric Double Layer Capacitor - EDLC) hosil bo'lishi va psevdokondensator xossalari orqali yuzaga keladigan faradaik reaksiyalar hisobiga. Ushbu mexanizmlar elektrod materiali tuzilishi va uning fizik-kimyoviy xossalari bilan bevosita bog'liq. Grafen asosidagi materiallar superkondensator elektrodleri uchun eng istiqbolli sinf hisoblanadi. Grafenning ikki o'lchamli tuzilishi,  $sp^2$ -gibridlangan uglerod atomlaridan tashkil topgan panjarasi yuqori elektr o'tkazuvchanlikni ta'minlaydi. Uning nazariy sirt maydoni  $2600\text{-}2630 \text{ m}^2/\text{g}$  atrofida bo'lib, bu qiymat ionlarning elektrodlerga maksimal adsorbsiyasini ta'minlaydi. Natijada, elektr ikki qatlam sig'imi sezilarli darajada ortadi. Grafen asosidagi elektrod materiallari uch asosiy yo'nalishda qo'llaniladi: sof grafen, grafen oksidi (GO) va qaytarilgan grafen oksidi (rGO). Sof grafen yuqori o'tkazuvchanlikka ega bo'lsa-da, uni katta miqdorda olish murakkab va qimmat. Shu sababli amaliyotda ko'proq GO va rGO materiallaridan foydalaniladi. Grafen oksidi kislorodli funksional guruhlar -gidroksil (-OH), epva boshqa erituvchilarda yaxshi dispersiyalanadi. Bu esa uni kompozit materiallar tayyorlashda qulay qiladi. Biroq, GO ning elektr o'tkazuvchanligi past bo'lganligi sababli, u to'g'ridan-to'g'ri elektrod sifatida kam qo'llaniladi. Shu sababli GO turli qaytaruvchi moddalar yordamida rGO ga aylantiriladi. rGO olish jarayoni kimyoviy, termik yoki elektroximik usullar orqali amalga oshiriladi. Kimyoviy qaytarishda askorbin kislota, gidrazin gidrat, natriy

borogidrid kabi moddalar ishlatiladi. Qaytarish jarayonida kislorodli guruhlar qisman ajralib chiqadi va grafenga yaqin tuzilma hosil bo'ladi. Natijada materialning elektr o'tkazuvchanligi ortadi va elektrokimyoviy faoliyati yaxshilanadi. Grafen asosidagi elektrodning ishlash samaradorligi ularning tuzilishiga bog'liq. Ikki o'lchamli grafen qatlamlari ko'pincha o'zaro yopishib qolib (restacking), faol sirt maydonining kamayishiga olib keladi. Bu muammoni hal qilish uchun uch o'lchamli (3D) g'ovak tuzilmalar - aerogellar, gidrogellar va ko'p qatlamli strukturalar ishlab chiqilmoqda. Bunday tuzilmalar ionlarning tez diffuziyasini va elektrolitning elektrodga erkin kirib borishini ta'minlaydi. Grafen asosidagi superkondensator elektrodli ko'pincha kompozit materiallar shaklida tayyorlanadi. Eng samarali kompozitlar quyidagilar hisoblanadi:

Grafen + metall oksidlar ( $MnO_2$ ,  $RuO_2$ ,  $Fe_3O_4$ )

Grafen + o'tkazuvchan polimerlar (polianilin, polipirol)

Grafen + uglerod nanotubalari

Metall oksidlar psevdokondensator xususiyatini beradi, ya'ni faradaik reaksiyalar orqali qo'shimcha sig'im hosil qiladi. O'tkazuvchan polimerlar esa yuqori sig'im va yaxshi ionalmashinish xususiyatlarini ta'minlaydi. Grafen esa ushbu tizimda o'tkazuvchan karkas vazifasini bajaradi. Grafen asosidagi elektrodlarda elektrokimyoviy jarayonlar odatda quyidagi ko'rsatkichlar bilan baholanadi:

Maxsus sig'im (Specific capacitance): 100–500 F/g

Energiya zichligi: 5–20 Wh/kg

Quvvat zichligi: 1000–10000 W/kg

Sikl barqarorligi: 90–95% (1000–10000 sikl davomida)

Elektrod materiallarini tayyorlashda ularning morfologiyasi muhim rol o'ynaydi. Yuqori g'ovaklikka ega strukturalar ionlarning tez harakatlanishini ta'minlaydi va ichki qarshilikni kamaytiradi. Shu sababli, zamonaviy tadqiqotlarda nanoarxitektura (nano-structured design) asosiy yo'nalishlardan biri hisoblanadi.

Grafen asosidagi superkondensator elektrodli ishlab chiqarishda elektrod tayyorlash usullari ham muhim ahamiyatga ega. Eng keng tarqalgan usullar:

Drop-casting (eritmadan quyish)

Spin-coating (aylantirib qoplash)

Electrophoretic deposition (elektroforetik cho'ktirish)

Binder-free elektrodli tayyorlash

Binder-free elektrodli (bog'lovchisiz) yuqori o'tkazuvchanlikni saqlaydi va faol materialning maksimal ishlatilishini ta'minlaydi. So'nggi yillarda grafen asosidagi superkondensatorlar energiya saqlash tizimlarida muhim o'rin egallab bormoqda. Ular elektromobillar, portativ elektronika, zaxira energiya tizimlari va sensor qurilmalarda keng qo'llanilmoqda. Ayniqsa, tez zaryadlanish va uzoq xizmat muddati talab qilinadigan sohalarda grafen asosidagi superkondensatorlar katta ustunlikka ega. Shu bilan birga, ilmiy tadqiqotlar grafen asosidagi materiallarning tuzilishini optimallashtirish, ularning kompozit

shakllarini ishlab chiqish va sanoat miqyosida arzon ishlab chiqarish texnologiyalarini yaratishga qaratilgan

### **MAVJUD MUAMMOLAR VA ULARNING TAHLILI:**

Grafen asosidagi superkondensator elektrodleri yuqori elektr o'tkazuvchanlik, katta sirt maydoni va yaxshi elektrokimyoviy xossalari bilan ajralib turishiga qaramay, ularni amaliy qo'llash jarayonida bir qator muhim muammolar mavjud. Ushbu muammolar materialning tuzilishi, sintez usullari va elektrokimyoviy jarayonlarning samaradorligi bilan bevosita bog'liq. Birinchi muhim muammo — grafen qatlamlarining aglomeratsiyasi yoki restacking hodisasidir. Grafenning ikki o'lchamli qatlamlari kuchli van-der-Vaals kuchlari ta'sirida bir-biriga yopishib qoladi. Natijada, grafenning nazariy jihatdan juda katta bo'lgan sirt maydoni amalda sezilarli darajada kamayadi. Bu esa ionlarning elektrodlerga kirib borishini cheklaydi va superkondensatorning umumiy sig'imini pasaytiradi. Ayniqsa, qaytarilgan grafen oksidi (rGO) materiallarida bu muammo yaqqol kuzatiladi, chunki qaytarish jarayonida qatlamlar zichlashib boradi. Ikkinchi muammo — grafen oksidining past elektr o'tkazuvchanligidir. GO tarkibidagi kislorodli funksional guruhlar elektronlarning erkin harakatlanishiga to'sqinlik qiladi. Shu sababli, GO to'g'ridan-to'g'ri elektrod sifatida samarali ishlamaydi. Uni rGO ga aylantirish zarur bo'ladi, biroq qaytarish struktura to'liq tiklanmaydi va nuqsonlar saqlanib qoladi. Bu esa materialning elektr xossalarini ideal darajaga yetkazishga to'sqinlik qiladi. Uchinchi muammo — grafen asosidagi materiallarning energiya zichligi nisbatan pastligidir. Superkondensatorlar yuqori quvvat zichligiga ega bo'lsa-da, ularning energiya zichligi an'anaviy akkumulyatorlarga nisbatan kamroq bo'lib qolmoqda. Bu cheklov ularni uzoq muddatli energiya saqlash tizimlarida qo'llash imkoniyatini kamaytiradi. To'rtinchi muammo — ishlab chiqarish texnologiyalarining murakkabligi va yuqori tannarxidir. Yuqori sifatli grafen olish uchun kimyoviy bug' fazasida cho'ktirish (CVD), Hummers usuli yoki boshqa murakkab texnologiyalar qo'llaniladi. Bu usullar katta miqdorda ishlab chiqarishda iqtisodiy jihatdan samarali emas. Ayniqsa, sanoat miqyosida bir xil sifatdagi grafen olish muammosi dolzarb bo'lib qolmoqda. Beshinchi muammo — elektrod materialining strukturaviy barqarorligi bilan bog'liq. Superkondensatorlar ko'p marta zaryadlanish va razryadlanish jarayonida ishlaydi. Bu jarayon davomida materialning tuzilishi o'zgarishi, mikro yoriqlar hosil bo'lishi yoki faol materialning elektrodan ajralib chiqishi kuzatilishi mumkin. Natijada qurilmaning xizmat muddati qisqaradi. Oltinchi muammo elektrolit bilan o'zaro ta'sirning yetarli darajada optimallashtirilmaganligidir. Elektrolit ionlarining o'lchami va elektrodning g'ovak tuzilishi o'zaro mos kelmasligi ionlarning diffuziyasini sekinlashtiradi. Bu esa superkondensatorning quvvat va sig'im ko'rsatkichlariga salbiy ta'sir qiladi. Yettinchi muammo — kompozit materiallarda komponentlar orasidagi bog'lanishning yetarli darajada mustahkam emasligidir. Grafen metall oksidlar yoki polimerlar bilan birlashtirilganda, ularning o'zaro interfeysi har doim ham barqaror bo'lmaydi. Bu esa uzoq muddatli ishlashda kompozitning degradatsiyasiga olib kelishi

=====  
mumkin. Shuningdek, ekologik va texnologik muammolar ham mavjud. Grafen oksidi sintezida ishlatiladigan kuchli oksidlovchilar (masalan, kaliy permanganat va konsentrlangan sulfat kislota) atrof-muhitga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Bu esa yashil kimyo tamoyillariga mos keladigan yangi sintez usullarini ishlab chiqishni talab etadi. Umuman olganda, grafen asosidagi superkondensator elektrodleri katta istiqbolga ega bo'lsa-da, yuqorida keltirilgan muammolar ularning keng miqyosda qo'llanilishiga to'sqinlik qilmoqda. Ushbu muammolarni chuqur tahlil qilish va ilmiy asosda hal etish zamonaviy materialshunoslik va elektrokimyo fanining asosiy vazifalaridan biri hisoblanadi.

