

ВПЛИВ НАНОЧАСТИНОК СРІБЛА НА ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ НАНОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ПОЛІЕТИЛЕНГЛІКОЛЮ

Едуард Лисенков

професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем

Чорноморський національний університет імені Петра Могили, вул. 68 десантників, 10, Миколаїв, Україна, 54003, ealysenkov@ukr.net

ORCID: 0000-0002-1369-4609

Олександр Стрюцький

старший науковий співробітник відділу хімії олігомерів і сітчастих полімерів

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, Харківське шосе, 48, Київ, Україна, 02160, striutskyi@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1457-2312

Полімерні нанокompозитні матеріали, які містять наночастинки металів, привертають увагу науковців та інженерів завдяки своїм унікальним властивостям, зокрема діелектричним, що відкриває нові можливості для їх практичного застосування. Поєднання поліетиленгліколевої матриці та стабілізованих наночастинок срібла у новому матеріалі є перспективним і потребує подальшого вивчення. Тому метою даної роботи була розробка нового підходу до синтезу наночастинок срібла та створення матеріалів на основі поліетиленгліколю та стабілізованих наночастинок срібла, а також дослідження їх діелектричних характеристик. У роботі використовуються сучасні методи дослідження та аналізу полімерних нанокompозитних матеріалів. Методом діелектричної релаксаційної спектроскопії отримано частотні залежності діелектричної проникності та діелектричних втрат досліджуваних матеріалів. У результаті було встановлено, що отримані наночастинки являють собою об'єкти типу «ядро-оболонка», всередині частинки знаходиться срібне ядро, покрите гіперрозгалуженою оболонкою іонної рідини. Стабілізовані наночастинки срібла істотно впливають на діелектричні властивості полімерної матриці при відносно низьких концентраціях наповнювача (1-2%). Діелектрична проникність і діелектричні втрати досліджуваних матеріалів значно залежали від вмісту наповнювача. Ця залежність пов'язана зі значною агрегацією наночастинок срібла у поліетиленгліколевій матриці. Використання стабілізованих наночастинок срібла дозволило досягти дуже низьких значень діелектричних втрат у матеріалах. Показано, що найбільший вплив на діелектричні властивості проявляється при вмісті 1% наповнювача. Розроблені матеріали з покращеними діелектричними властивостями можуть бути використані у майбутньому як середовища для конденсаторів з високою щільністю накопичення енергії, а також як покриття з необхідними діелектричними властивостями.

Ключові слова: наночастинки срібла, полімерні нанокompозити, діелектрична проникність, діелектричні втрати, міжфазна поляризація.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Полімерні композитні матеріали, наповнені частинками металів, дедалі активніше використовуються у світовій практиці. Практичне застосування таких матеріалів постійно зростає, що викликано тим, що вони поєднують оптимальні властивості полімерів та неорганічних частинок [1; 2]. Особливе місце серед металополімерних композитів займають матеріали із включенням наночастинок срібла (AgNPs). Показано, що властивості наносрібла відрізняються від властивостей макро-матеріалу [3]. Для виготовлення матеріалів на основі полімеру та наночастинок срібла існують багато методів. Серед цих методів є плазмове нанесення, іонна імплантація, обробка розплаву, пошарове нанесення на волокно, лиття розчину та органо-неорганічне гібридне покриття тощо

[4]. Ці методи мають як свої переваги, так і недоліки. Тому підбір методу виготовлення є складною задачею і потребує подальшого вивчення.

Особливу увагу також приділяють вибору полімерної матриці. Цей вибір безпосередньо залежить від бажаного комплексу фізико-механічних та функціональних властивостей матеріалу. Серед матриць для створення полімерних нанокompозитів використовують як термопластичні, так і термореактивні полімери. Поліетиленоксид або його більш низькомолекулярний гомолог поліетиленгліколь (ПЕГ), серед інших добре вивчених полімерів, є матрицею, яка добре підходить для інкапсуляції металевих наночастинок [5], таких як срібло. Так, матеріали на основі поліетиленоксиду та полівінілпропілону, наповнені наночастин-

ками срібла, при додатковому введенні неорганічної солі показали прийнятні характеристики та були перспективними для створення твердих полімерних електролітів для літєвих джерел струму [6]. Також полімерні наноккомпозити, які містять наночастинки срібла, характеризуються високою діелектричною проникністю і низькими діелектричними втратами. Такі матеріали широко використовуються в багатьох галузях, включаючи конденсатори з високою щільністю накопичення енергії та високошвидкісні інтегральні схеми, завдяки їх гнучкості та адаптованим діелектричним властивостям [7]. Для отримання матеріалів із необхідними діелектричними характеристиками використовують наночастинки срібла із модифікованою поверхнею (стабілізовані). Так, автори роботи [8] вивчали вплив стабілізованих наночастинок срібла на діелектричні властивості матеріалу на основі полівініліденфториду. Вони встановили, що після модифікації наночастинок Ag за допомогою TiO_2 діелектрична проникність при 100 Гц композитів, які містили 50 об. % наповнювача становила, 61, а діелектричні втрати знизилися до 0,04, що майже на 96,4% нижче, ніж у композитів з немодифікованими частинками срібла.

Отже, поєднання матриці поліетиленгліколю та стабілізованих наночастинок срібла у новому матеріалі є перспективним і потребує подальшого вивчення. Тому метою даної роботи є розроблення нового матеріалу на основі поліетиленоксиду та наночастинок срібла, а також дослідження його діелектричних властивостей.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА. Поліетиленгліколь (ПЕГ 1000), $\text{HO}[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}]_n\text{H}$ ($n \approx 22$) молекулярної маси $M_w = 1000$, виробництва компанії Aldrich, був обраний полімерною матрицею. При $T = 298$ К ПЕГ-1000 є твердою речовиною з густиною $\rho = 1070$ кг/м³. Температура плавлення $T_{\text{пл}} \approx 34\text{--}35$ °С.

Циклічний ангідрид 2-сульфобензойної кислоти ("Aldrich" $\geq 95\%$), N-метилімідазол ("Aldrich", 99%), AgNO_3 (фарм.) і тринатрійцитрат ($\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\text{Na}_3$, фарм.) використовували без додаткової очистки; гіперрозгалужений аліфатичний олігоестерполіол Boltorn®H30 ("Perstorp" Sweden) MM 3500 (еквівалентна MM олігомеру за гідроксильними групами, визначена методом ацилювання, складає 117 г/екв) очищали шляхом переосадження з ацетону в етер з наступною сушкою в вакуумі (1-3 мм.рт.ст.) при темпера-

турі 25-30°C протягом 6 год; диметилформамід (ДМФА) переганяли при залишковому тиску 1-3 мм.рт.ст, а етанол та діетиловий етер використовували без перегонки.

Синтез аніонної протонної олігомерної іонної рідини гіперрозгалуженої будови $\text{GP}-([\text{SO}_3]^-[\text{HMim}^+])_{32}$ здійснювали в дві стадії у відповідності з раніше розробленою нами методикою [9]. На першій стадії проводили вичерпне ацилювання олігоестерполіолу (містить 32 кінцеві первинні гідроксильні груп) циклічним ангідридом 2-сульфобензойної кислоти в ДМФА при 80-90°C з наступним частковим видаленням розчинника при зниженому тиску, висаджуванням продукту реакції в етер та сушкою вакуумі. На другій стадії отриманий продукт реакції нейтралізували N-метилімідазолом в етанолі за кімнатної температури з наступним частковим випарюванням розчинника, висаджуванням отриманої сполуки в етер, очисткою переосадженням зі спирту в етер та сушкою в вакуумі.

Синтез наночастинок $\text{Ag}(0)$ здійснювали відновленням іонів $\text{Ag}(I)$ в складі AgNO_3 тринатрійцитратом в присутності розробленого нами іонмісного олігомеру гіперрозгалуженої будови $\text{GP}-([\text{SO}_3]^-[\text{HMim}^+])_{32}$ як стабілізатора їх поверхні. До 0,941 г (0,002202 екв) $\text{GP}-([\text{SO}_3]^-[\text{HMim}^+])_{32}$ в 22 мл води добавляли 0,125 г (0,000734 екв) AgNO_3 в 8 мл води, перемішували суміш 10 хв за кімнатної температури, добавляли 0,731 г (0,002833 екв) $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\text{Na}_3$ в 30 мл води та перемішували ще 10 хв. Далі температуру розчину піднімали до 100°C та кип'ятили зі зворотним холодильником 1 год. При цьому колір розчину змінювався від жовтого до коричневого. Розчин фільтрували, воду випарювали при 70-75°C, отриманий у вигляді коричневого осаду продукт вакуумували при залишковому тиску 1-3 мм.рт.ст. і температурі 75-80°C, промивали етанолом та сушили в вакуумі (1-3 мм.рт.ст.) при 75-80°C. Вихід продукту 0,868 г (85,2%). Отриманий продукт являє собою коричневий порошок розчинний у воді та нерозчинний в органічних розчинниках.

На рис. 1 приведена мікрофотографія для синтезованих наночастинок срібла. На фотографії спостерігаються роєподібна структура, що складається із нанорозмірних частинок. Видно, що частинки мають структуру типу ядро-оболонка, де наночастинка срібла є ядром, а органічний стабілізатор – оболонкою. Аналіз мікрофотографій показав, що середній розмір отриманих наночастинок становить 8-10 нм.

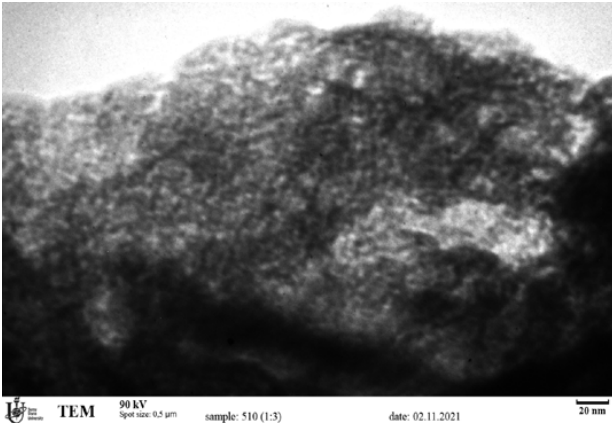


Рисунок 1 – Фотографія наночастинок срібла у порошкоподібному стані

Нанокмпозити були приготовані методом ультразвукового змішування у розплаві за допомогою ультразвукового диспергатора УЗД-А650. Час диспергування становив 5 хв, потужність – 150 Вт.

Діелектричні властивості досліджували методом діелектричної релаксаційної спектроскопії, реалізованої на базі вимірювача іммітансу Е7-20. Частотний інтервал вимірювання становив від 10 Гц до 1 МГц. Товщина зразків становила 100 мкм.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ. При вивченні електрофізичних властивостей полімерних композитів особлива увага приділяється питанням, пов'язаним із процесами перенесення та накопичення заряду. З урахуванням останніх досягнень в області розробок експериментальної техніки одним із методів їх оцінки є діелектрична релаксаційна спектроскопія. Даний метод вимірює відгук досліджуваної системи, та змінюється зовнішнє електричне поле, що відображає її структурні особливості і дозволяє отримати ряд діелектричних показників, таких як комплексна $\epsilon^* = \epsilon' + j\epsilon''$ (дійсна (ϵ') та уявна (ϵ'')) діелектрична проникність, електропровідність (σ'), а також тангенс кута діелектричних втрат ($\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$).

На рис. 2 приведена залежність діелектричної проникності від вмісту наночастинок срібла для систем на основі поліетиленгліколю. Як видно, з рис. 2 дійсна частина діелектричної проникності (ϵ') композитних матеріалів проявляє нелінійну поведінку в широкому діапазоні частот. В інтервалі частот від 10^1 до 10^4 Гц діелектрична проникність різко спадає, а в інтервалі 10^4 – 10^6 Гц майже не залежить від частоти. Високі значення діелектричної проникності при низьких частотах та її різке спадання пов'язане із так званим «ефектом блокування електроду» на межі розподілу електрод-композит.

тах та її різке спадання пов'язане із так званим «ефектом блокування електроду» на межі розподілу електрод-композит.

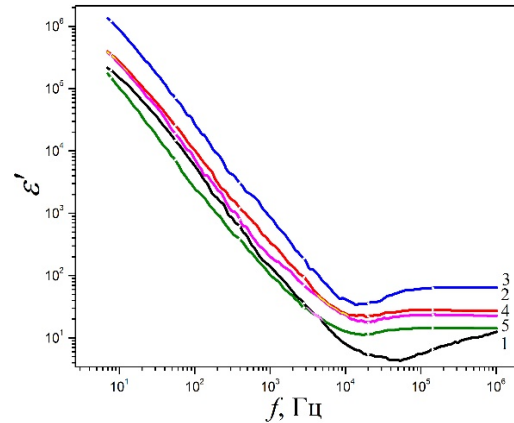


Рисунок 2 – Частотні залежності діелектричної проникності для матеріалів на основі ПЕГ-1000, які містять НЧАг: 1 – 0%; 2 – 0,5%; 3 – 1%; 4 – 1,5%; 5 – 2%.

Частотна інваріантність діелектричної проникності, ймовірно, пов'язана із структурою НЧАг, які мають ядро зі срібла та оболонку із гіперрозгалуженої іонної рідини, при цьому створюється мінімальний градієнт діелектричної проникності між матрицею та наповнювачем. Встановлено, що з підвищенням концентрації наночастинок срібла у полімерну матрицю показники діелектричної проникності також збільшуються.

Для більш зручного аналізу на рис. 3 приведений графік залежності діелектричної проникності від вмісту НЧАг при частоті 1 кГц. З рис. 3 видно, що графік залежності $\epsilon'(\varphi)$ носить екстремальний характер. Спочатку діелектрична проникність зростає зі збільшенням вмісту наповнювача, досягаючи максимум при вмісті 1 % НЧАг. Таке зростання пояснюється формуванням у полімерній матриці розгалуженого кластера із частинок срібла.

Важливу роль у зростанні діелектричної проникності відіграє Maxwell-Wagner-Sillars (MWS)-поляризація [10], яка викликана мережею розгалужених електропровідних кластерів із частинок срібла, які напряду не контактують між собою. Завдяки наявності органічної оболонки відстань між частинками недостатня для перескоку зарядів або для їх тунелювання. При накладанні зовнішнього електричного поля на поверхнях сусідніх НЧАг, які розділені непровідною полі-

мерної матрицею, накопичуються протилежні за знаком заряди. При цьому по всьому об'єму нанопоповненої системи утворюються велика кількість маленьких конденсаторів, які роблять значний вклад у діелектричну проникність систем. Максимальна поверхня наночастинок срібла у системі досягається при їх вмісті 1%. Після досягнення цієї концентрації діелектрична проникність починає спадати, при збільшенні вмісту наповнювача (рис. 3). Цей ефект пов'язаний із інтенсивною агрегацією наночастинок срібла у матриці ПЕГ-1000. При злипанні частинок значно знижується поверхня взаємодії частинка-матриця, що приводить до зниження діелектричної проникності матеріалу.

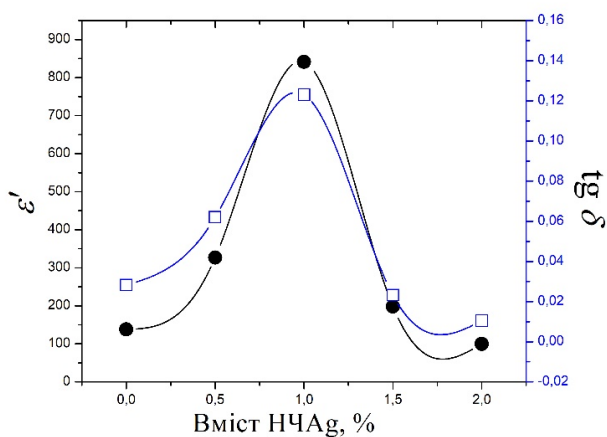


Рисунок 3 – Концентраційна залежність діелектричної проникності та діелектричних втрат при частоті 1 кГц для матеріалів на основі ПЕГ-1000.

Отже, відносна частотна інваріантність діелектричної проникності та її високе значення дозволяє використовувати отримані систем як матеріали із високою діелектричною проникністю для конденсаторів та інших електротехнічних приладів.

Діелектричні втрати ($\text{tg } \delta$) композитів на основі ПЕГ та НЧAg є досить низькими у частотному інтервалі від 10^2 до 10^5 Гц (рис. 4). Ці значення є нижчими ніж діелектричні втрати для багатьох двофазних композитних систем [11].

Для нанокомпозитного матеріалу, який містить 2% наночастинок $\text{tg } \delta$ становив 0,01 при 1 кГц. Низьке значення $\text{tg } \delta$ для композитів, які містять НЧAg, пов'язано з наявністю стабілізатора (макромолекул гіперрозгалуженої іонної рідини) на поверхні наночастинок Ag, який утворює ізоляційну оболонку навколо частинки.

Оскільки наявність ізоляційної оболонки перешкоджає прямому контакту між наночастинками Ag, то це значно впливає на значення $\text{tg } \delta$. Більші значення $\text{tg } \delta$ у частотному діапазоні до 10^2 Гц для всіх досліджуваних систем зумовлені ефектом міжфазної поляризації внаслідок релаксаційних втрат, спричинених поляризацією поверхні (MWS). Висновок про наявність міжфазної поляризації підтверджується даними для діелектричної проникності (рис. 2). Різке ж зростання $\text{tg } \delta$ у високочастотному діапазоні 10^5 - 10^6 Гц вказує на наявність іншого типу релаксації, яка викликана дипольно-орієнтаційною поляризацією [12].

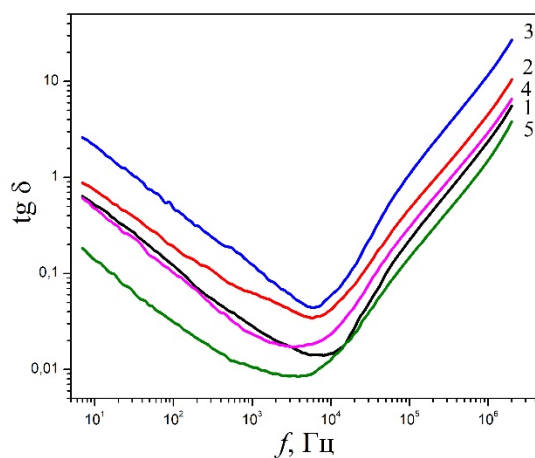


Рисунок 4 – Частотні залежності тангенса кута діелектричних втрат для матеріалів на основі ПЕГ-1000, які містять НЧAg: 1 – 0%; 2 – 0,5%; 3 – 1%; 4 – 1,5%; 5 – 2%.

Аналогічною до діелектричної проникності є поведінка залежності діелектричних втрат від вмісту наночастинок срібла (рис. 3). При цьому $\text{tg } \delta$ спочатку зростає зі зростанням вмісту наповнювача, досягаючи максимум при концентрації 1% НЧAg, після чого спостерігається зниження діелектричних втрат. Така поведінка пояснюється агрегаційними процесами у полімерному композитному матеріалі, а саме зміною поверхні взаємодії матриця-наповнювач. Ці дані підтверджують висновок про те, що при 1% вмісту НЧAg у системі наповнювач розподіляється найбільш рівномірно, що значно впливає на кінцеві діелектричні властивості матеріалу. Подальші процеси агрегації, що відбуваються при зростанні концентрації наповнювача, нівелюють вплив поверхневих поляризаційних ефектів, тому діелектричні характеристики погіршуються.

ВИСНОВКИ. У даній роботі було запропоновано новий підхід до синтезу стабілізованих наночастинок срібла та досліджено діелектричні властивості полімерних наноккомпозитних матеріалів на основі поліетиленоксиду. Отримані наночастинки представляють собою об'єкти типу «ядро-оболонка», всередині частинки знаходиться ядро із срібла, вкрите оболонкою із гіперрозгалуженої іонної рідини. Встановлено, що стабілізовані наночастинки срібла суттєво впливають на діелектричні властивості полімерної матриці при відносно низьких концентраціях нанонаповнювача (~ 1-2%). При цьому діелектрична проникність та діелектричні втрати проявляють екстремальну поведінку зі збільшенням вмісту наповнювача у системі. Визначено, що найбільший вплив на діелектричні властивості досліджуваних систем спостерігається при концентрації наночастинок срібла рівній 1%. Встановлено, що у досліджуваних композитних системах має місце два типи поляризації: міжфазна та дипольно-орієнтаційна. Розроблені матеріали з покращеними діелектричними характеристиками в майбутньому можуть бути використані як середовища для конденсаторів з високою щільністю накопичення енергії, а також покриття з необхідними діелектричними характеристиками.

ЛІТЕРАТУРА

1. Wan J., Fan B., Thang S.H. Sonochemical preparation of polymer-metal nanocomposites with catalytic and plasmonic properties. *Nanoscale Adv.* 2021. Vol. 3. P. 3306–3315.
2. Giliopoulos D., Zamboulis A., Giannakoudakis D., Bikiaris D., Triantafyllidis K. Polymer/Metal Organic Framework (MOF) Nanocomposites for Biomedical Applications. *Molecules.* 2020. Vol. 25, № 1. P. 185.
3. Olmos D., González-Benito J. Polymeric Materials with Antibacterial Activity: A Review. *Polymers (Basel).* 2021. Vol. 13, № 4. P. 613.
4. Jokar M., Loeschner K., Nafchi A.M. Modeling of Silver Migration from Polyethylene Nanocomposite Package Response Surface Methodology. *International Journal of Food Engineering.* 2016. Vol. 2, № 2. P. 96–102.
5. Farea M.O., Abdelghany A.M., Oraby A.H. Optical and dielectric characteristics of polyethylene oxide/sodium alginate-modified gold nanocomposites. *RSC Adv.* 2020. Vol. 10. P. 37621.
6. Kumar K.N., Kang M., Sivaiah K., Ravi M., Ratnakaram Y.C. Enhanced electrical properties of polyethylene oxide (PEO)+polyvinylpyrrolidone (PVP):Li⁺ blended polymer electrolyte films with addition of Ag nanofiller. *Ionics.* 2015. Vol. 22. P. 815–825.
7. Chen Q., Shen Y., Zhang S. et al. Polymer-based Dielectrics With High Energy Storage Density. *Annual Review of Materials Research.* 2015. Vol. 45. P. 433–445.
8. Jinhang D., Shunliang M., Chuntian Y., L. et al. Effect of Nano Silver Modification on the Dielectric Properties of Ag@TiO₂/PVDF Composites. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2021. Vol. 36. P. 303–310.
9. Shevchenko V.V., Stryutsky A.V., Klymenko N.S. et al. Protic and aprotic anionic oligomeric ionic liquids. *Polymer.* 2014. Vol. 55, № 16. P. 3349–3359.
10. Samet M., Kallel A., Serghei A. Maxwell-Wagner-Sillars interfacial polarization in dielectric spectra of composite materials: Scaling laws and applications. *Journal of Composite Materials.* 2022. Vol. 56 (20). P. 3197–3217.
11. Wang Z., Fang M., Li H., Wen Y., Wang C., Pu Y. Enhanced dielectric properties in poly(vinylidene fluoride) composites by nanosized Ba(Fe_{0.5}Nb_{0.5})O₃ powders. *Compos. Sci. Technol.* 2015. Vol. 117. P. 410–416.
12. Chen G., Wang X., Lin J., Yang W., Li H., Wen Y. Interfacial Polarity Modulation of KTa_{0.5}Nb_{0.5}O₃ Nanoparticles and Its Effect on Dielectric Loss and Breakdown Strength of Poly(vinylidene fluoride) Nanocomposites with High Permittivity. *J. Phys. Chem. C.* 2016. Vol. 120. P. 28423–28431.

THE EFFECT OF SILVER NANOPARTICLES ON THE DIELECTRIC PROPERTIES OF POLYMER NANOCOMPOSITES BASED ON POLYETHYLENE GLYCOL

Eduard Lysenkov

Professor of the department of intellectual information systems

Petro Mohyla Black Sea National University, 68 desantnykiv Str., 10, Mykolaiv, Ukraine, 54003, ealysenkov@ukr.net

ORCID: 0000-0002-1369-4609

Oleksandr Strutkyi

Senior researcher of the department of chemistry of oligomers and network polymers Institute of Macromolecular Chemistry NAS of Ukraine,

Kharkivske shosse, 48, Kyiv, Ukraine, 02160, striutskyi@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1457-2312

Purpose. The combination of polyethylene glycol matrix and stabilized silver nanoparticles in the new material is promising and requires further study. Therefore, the purpose of this work was the development of a new approach to the synthesis of silver nanoparticles and the creation of materials based on polyethylene glycol and stabilized silver nanoparticles, as well as the study of its dielectric characteristics. **Methodology.** Modern methods of studying and analysis of polymer nanocomposite materials are used in the work. Dielectric relaxation spectroscopy was used to obtain frequency dependences of dielectric permittivity and dielectric loss of studied materials. **Results.** As a result, it was established that the obtained nanoparticles are core-shell objects, inside the particle is a silver core covered with a hyperbranched ionic liquid shell. Stabilized silver nanoparticles significantly affect the dielectric properties of the polymer matrix at relatively low concentrations of the nanofiller (1-2 %). Dielectric permittivity and dielectric loss of the studied materials depended extremely on the filler content. This dependence is associated with significant aggregation of silver nanoparticles in the polyethylene glycol matrix. The use of stabilized silver nanoparticles made it possible to achieve very low dielectric loss values in the materials. It is shown that the greatest effect on the dielectric properties is manifested at the content of 1% of the filler. **Originality.** A new technological approach to the synthesis of stabilized silver nanoparticles, is proposed. Materials based on polymer and silver nanoparticles with improved dielectric characteristics were created. **Practical value.** Developed materials with improved dielectric properties can be used in the future as mediums for capacitors with high energy storage density, as well as coatings with the required dielectric properties.

Key words: silver nanoparticles, polymer nanocomposites, dielectric constant, dielectric loss, interphase polarization.

REFERENCES

1. Wan J., Fan B., Thang S.H. (2021). Sonochemical preparation of polymer–metal nanocomposites with catalytic and plasmonic properties. *Nanoscale Adv.* Vol. 3. pp. 3306–3315.
2. Giliopoulos D., Zamboulis A., Giannakoudakis D., Bikiaris D., Triantafyllidis K. (2020). Polymer/Metal Organic Framework (MOF) Nanocomposites for Biomedical Applications. *Molecules.* Vol. 25, № 1. p. 185.
3. Olmos D., González-Benito J. (2021). Polymeric Materials with Antibacterial Activity: A Review. *Polymers (Basel).* Vol. 13, № 4. p. 613.
4. Jokar M., Loeschner K., Nafchi A.M. (2016). Modeling of Silver Migration from Polyethylene Nanocomposite Package Response Surface Methodology. *International Journal of Food Engineering.* Vol. 2, № 2. pp. 96–102.
5. Farea M.O., Abdelghany A.M., Oraby A.H. (2020). Optical and dielectric characteristics of polyethylene oxide/sodium alginate-modified gold nanocomposites. *RSC Adv.* Vol. 10. p. 37621.
6. Kumar K.N., Kang M., Sivaiah K., Ravi M., Ratnakaram Y.C. (2015). Enhanced electrical properties of polyethylene oxide (PEO)+polyvinylpyrrolidone (PVP):Li+ blended polymer electrolyte films with addition of Ag nanofiller. *Ionics.* Vol. 22. pp. 815–825.
7. Chen Q., Shen Y., Zhang S. et al. (2015). Polymer-based Dielectrics With High Energy Storage Density. *Annual Review of Materials Research.* Vol. 45. pp. 433–445.
8. Jinhang D., Shunliang M., Chuntian Y., L. et al. (2021). Effect of Nano Silver Modification on the Dielectric Properties of Ag@TiO₂/PVDF Composites. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* Vol. 36. pp. 303–310.
9. Shevchenko V.V., Stryutsky A.V., Klymenko N.S. et al. (2014). Protic and aprotic anionic oligomeric ionic liquids. *Polymer.* Vol. 55, № 16. pp. 3349–3359.
10. Samet M., Kallel A., Serghei A. (2022). Maxwell-Wagner-Sillars interfacial polarization in dielectric spectra of composite materials: Scaling laws and applications. *Journal of Composite Materials.* Vol. 56 (20). pp. 3197–3217.
11. Wang Z., Fang M., Li H., Wen Y., Wang C., Pu Y. (2015). Enhanced dielectric properties in poly(vinylidene fluoride) composites by nanosized Ba(Fe_{0.5}Nb_{0.5})O₃ powders. *Compos. Sci. Technol.* Vol. 117. pp. 410–416.
12. Chen G., Wang X., Lin J., Yang W., Li H., Wen Y. (2016). Interfacial Polarity Modulation of KTa_{0.5}Nb_{0.5}O₃ Nanoparticles and Its Effect on Dielectric Loss and Breakdown Strength of Poly(vinylidene fluoride) Nanocomposites with High Permittivity. *J. Phys. Chem. C.* Vol. 120. pp. 28423–28431.

Стаття надійшла 15.05.2022