

FİZİKA

UOT 543.06; 543.08

**OKSİD NANOHISSƏCİKLƏRİ İLƏ MODİFİKASIYA OLUNMUŞ
KARBON NANOBORU ƏSASLI ELEKTROKİMYƏVİ
BİOSENSORLAR****S.C.MƏMMƏDYAROVA, S.Q.NURİYEVA, A.M.RƏHİMLİ***Bakı Dövlət Universiteti*
rahimli.almara@gmail.com

Nanomaterialların üstün xassələrindən istifadə etməklə yeni elektrokimyəvi sensorların hazırlanması tədqiqat sahələrində mühüm diqqət cəlb edir. Kiçikölçü, silindrik forma, səth-həcm nisbəti, yüksək keçiricilik və yaxşı bio-uyğunluq səbəbindən karbon nanoborular (KNB) elektrokimyəvi biosensorların hazırlanması üçün geniş şəkildə öyrənilmiş və istifadə edilmişdir. Təqdim olunan qısa icmal məqalə oksid nanohissəcikləri ilə modifikasiya olunmuş karbon nanoboru əsaslı elektrokimyəvi biosensorların hazırlanması və xassələri haqqındadır.

Açar sözlər: karbon nanoboruları, biosensor, metal oksid nanohissəcikləri

1.Giriş

Qlükoza biosensorları (GBFC), qlükoza mənbələrinin (məsələn, nişasta, sellüloza [1]) çoxluğu və qlükozanın tam oksidləşməsindən sonra əmələ gələn çox yüksək enerji ($-2.87 \times 10^3 \text{ kJ mol}^{-1}$) səbəbindən perspektivli yeni nəsil enerji saxlama sistemləri [2-6] kimi çox diqqət cəlb etmişdir. Bununla yanaşı, GBFC-lərin aktivliyi qlükoza oksidləşmə reaksiyası (QOR) üçün mühüm hesab olunan katalizatorlardan çox asılıdır [2]. Ümumiyyətlə, GBFC-lərdə iki növ katalizator istifadə olunur: bioloji və qeyri-bioloji [7]. Bioloji katalizatorlar qlükoza molekullarının anod oksidləşməsi üçün xüsusi fermentlərdir. Lakin zəif stabillik [8], zəif immobilizasiya üsulları [7], iş mühitinə həssaslıq və uzunmüddətli işləmə həssaslığı səbəbindən fermentlərin GBFC-lərə tətbiqi məhdudlaşdırılır [9]. Bu problemlər fermentativ GBFC-lərin inkişafı üçün aradan qaldırılmalıdır [1]. Qeyri-bioloji katalizatorlara misal olaraq qlükozanın oksidləşməsi üçün müstəsna katalitik xüsusiyyətlərə malik qiymətli metalları (Pd [10] və Au [8,11,12]) və metal oksidlərini (Co_3O_4 [13] və CuO [14]) göstərmək olar [15]. Son zamanlar kobalt oksid (Co_3O_4) ucuz, yaxşı elektrokimyəvi və katalitik xüsusiyyətlərinə görə qeyri-bioloji katalizator kimi diqqət çəkir [16-19]. Verilmiş bir işdə, GBFC-lərdə qlükoza oksidləşməsi üçün mükəmməl katalitik

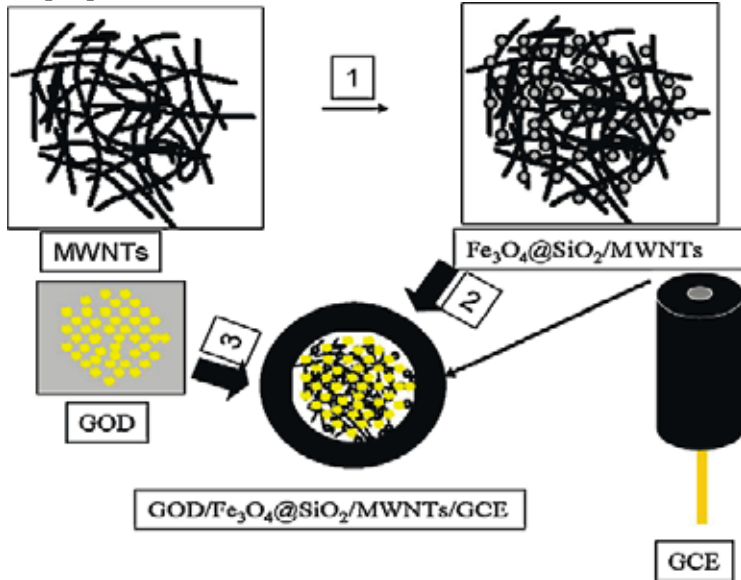
xüsusiyyətlərə malik olan Co_3O_4 içi boş nanodekahedraları təsvir edilmiş [13], qlükoza fermentləri üçün uyğun bir alternativ olaraq Co_3O_4 istifadə edilməsinin mümkünlüyü göstərilmişdir. Lakin Co_3O_4 -ün elektrik keçiriciliyi zəifdir və ümumiyyətlə, Co_3O_4 -un katalitik aktivliyini araşdırarkən keçirici karbon əsaslı maddələr istifadə olunur. Katalitik aktivliyi artırmaq üçün metal/metal oksid və karbon kompozitlərinin sintezi tədqiqatçıların geniş marağına səbəb olmuşdur. Karbon əsaslı nanomateriallar arasında yüksək elektrik keçiriciliyi, geniş səth sahəsi, yüksək mexaniki dayanıqlılıq və struktur elastikliyinə malik olan karbon nanoboruları (KNB) kompozit katalizatorlar üçün perspektivli altlıqlardır [20-22]. Hər bir komponentin inkişaf etmiş xüsusiyyətlərini özündə birləşdirən metal oksid/KNB nanokompozitləri kataliz, sensor və enerji yığıcı kimi sahələrdə geniş tətbiq tapmışdır. Çox divarlı KNB-larda baş verən reaksiyalar onların daxili qrafit divarlarını məhv edə bilmir və beləliklə, yaxşı keçiriciliyə malik olmasını təmin edir [23].

2. Co_3O_4 /KNB əsaslı biosensörler. K. Jiao və əməkdaşları tək mərhələli hidrotermiki metodla Co_3O_4 / çoxlaylı karbon nanoborular (Co_3O_4 /ÇKNB) əsasında üçölçülü nanoquruluşlar sintez etmişlər və bu nanokompozit qələvi mühitdə qlükozanın oksidləşməsi üçün yüksək elektrokatalitik aktivlik nümayiş etdirmişdir. Bu nanokompozitin elektrokatalitik mexanizmi rentgen fotoelektron spektroskopiyaya və tsiklik voltammetriya ilə tədqiq edilmişdir. Tsiklik voltammetriya ölçmələri 0.1 M KOH elektrolitində 0–0.7 V intervalında həyata keçirilmişdir və işçi elektrod kimi modifikasiya olunmuş şüşə karbon elektrod istifadə olunmuşdur. Rentgen difraksiya və Skanedici elektron mikroskopiyaya nəticələrinə əsasən nanokompozitdə Co_3O_4 hissəciklərinin ölçüləri (3–6 nm) təmiz Co_3O_4 hissəciklərinə (8.5–10 nm) nəzərən kiçikdir və bu, nanoboru iştirakında Co_3O_4 -ün nukleasiya sürətinin yüksək olması ilə əlaqədardır. Co_3O_4 /ÇKNB kompozitinin cərəyan sıxlığı təmiz Co_3O_4 -ə nəzərən yüksəkdir və bu 2 səbəblə izah olunmuşdur: 1) Co_3O_4 /ÇKNB kompoziti təmiz Co_3O_4 -ə nəzərən daha yaxşı keçiriciliyə malikdir; 2) Nanokompozitdə Co_3O_4 hissəciklərinin kiçikölçülü olması elektrolitlə daha yüksək kontakt sahəyə səbəb olur. Nanokompozitlə modifikasiya olunmuş elektrod 5.8 mM-dək qlükozaya cavab verir və bu, qan nümunələrində (3–8 mM) qlükozanın təyini üçün istifadə oluna bilər. Qeydetmə limiti 2 μM -dır [24]. I. Liaqat və əməkdaşları tərəfindən Co_3O_4 nanokublar hidrotermiki üsulla tək laylı karbon nanoboruların (TKNB) sp^2 qəfəs karbonlarına daxil edilmiş və damcı üsulu ilə şüşə karbon elektrodun səthinə əlavə olunmuşdur. Bu nanokompozit əsasında hazırlanmış biosensör 1-dən 5 mM-dək 96.92 $\mu\text{A mM}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ həssaslıq nümayiş etdirərək yüksək elektrokatalitik aktivliyə malik olmuşdur və qeydetmə limiti 0.25 μM -dır. Bundan əlavə bu biosensör dopamin, askorbin turşusu, NaCl, sidik cövhəri və sidik turşusu ilə müqayisədə qlükoza üçün daha yüksək seçicilik (7-14 dəfə) göstərmişdir [25]. X. Lin və əməkdaşları solvotermiki metodla Co_3O_4 -ÇKNB nanokompozitini sintez etmişlər və işçi elektrod kimi bu nanokompozitlə modifikasiya olunmuş şüşə karbon elektrodan (ŞKE) istifadə etməklə qlükozanın

elektrokatalitik aktivliyini tədqiq etmişlər. Işıqburaxan elektron mikroskopiya nəticələrinə əsasən orta diametri təqribən 15 nm olan kubabənzər Co_3O_4 nanohissəcikləri ÇKNB ətrafında bərabər paylanmışdır. Sensor qlükozanın qeyd edilməsi üçün yüksək həssaslığa malik olmuşdur. Bunun səbəbi Co_3O_4 -ÇKNB/ŞKE-un geniş səth sahəsinə malik olması, çox sayda elektroaktiv maddəni effektiv şəkildə dəstəkləməsi və bununla da proton və elektron ötürülməsini əhəmiyyətli dərəcədə artırmasıdır. Bundan əlavə bu nəticə Co_3O_4 və ÇKNB-nin sinergetik katalitik təsirləri ilə əlaqəli ola bilər [26]. S. Wang və əməkdaşları tərəfindən karbon nanoboruları üzərində in situ dekorasiya olunmuş 3D ierarxik içiboş, məsaməli Co_3O_4 nanododekahedralar əsaslı qeyri-fermentativ katalizator karbon nanoborular üzərində in situ yetişdirilmiş metalüzvi çərçivə 67-nin suzuzlaşdırılması ilə müvəffəqiyyətlə sintez olunmuşdur. Bu nanokompozit qlükozanın sensoru kimi yüksək həssaslıq ($22.21 \text{ mA mM}^{-1} \text{ cm}^{-2}$), aşağı qeydetmə limiti ($0.35 \text{ }\mu\text{M}$) və yüksək davamlılıq nümayiş etdirmişdir [27].

3. Fe_3O_4 /KNB əsaslı biosensörlar. M.Kundu və həmkarları qidada tez-tez rast gəlinən formadehidi təyin etmək üçün Fe_3O_4 /KNB əsaslı elektrokimyəvi biosensör hazırlamışlar. Yaxşı dispersləşmiş Fe_3O_4 nanohissəcikləri kimyəvi çökdürmə metodu ilə sintez olunmuş və kristallik ölçü 14 nm-ə bərabər olmuşdur. Bu nanokompozit əsasında hazırlanmış biosensör formaldehid dehidrogenaza fermentindən istifadə edilərək $0.05\text{--}0.5 \text{ mg/L}$ xətti qeydetmə intervalında formaldehidin qeyd edilməsi üçün yüksək həssaslıq ($527 \text{ }\mu\text{A mg/L}^{-1} \text{ cm}^{-2}$), aşağı qeydetmə limiti (0.05 mg/L) nümayiş etdirmişdir [28]. W. Zhang Fe_3O_4 /KNB nanokompozitini DNA hibridləşməsi üçün elektrokimyəvi biosensör kimi tətbiq etmişdir. Biosensörün stabilliyini tədqiq etmək üçün bu nanokompozitlə modifikasiya olunmuş karbon pasta elektrod fosfat bufer məhlulunda ($\text{pH}=7.0$) 25°C temperaturda 24 saat müddətində saxlanılmışdır. Sonra bu elektrod $1.0 \text{ mmol L}^{-1} [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$ -də test edilmiş və alınmış elektrokimyəvi impedans spektroskopik (EİS) siqnal digər elektrodla müqayisədə, demək olar ki, dəyişməz qalmışdır. Bu elektrod 4°C -də 7 gün saxlandıqdan sonra impedans siqnalda 4.63% azalma müşahidə edilməsi onun yaxşı stabilliyə malik olduğunu göstərir [29]. S.Masoomi-Godarzi və əməkdaşları Fe_3O_4 nanohissəcikləri ilə dekorasiya olunmuş ÇKNB ilə modifikasiya olunmuş şüşə karbon elektrodan istifadə edərək qeyri-fermentativ elektrokimyəvi qlükoza biosensörü hazırlamışlar. Modifikasiya olunmuş elektrodun qlükozanın oksidləşməsi üçün elektrokatalitik aktivliyi $\text{pH}=7.0$ -da 0.05M fosfat bufer məhlulunda tsiklik voltammetriya və amperometriya ilə qiymətləndirilmişdir. Elektrod səthi ilə qlükoza arasındakı birbaşa elektron ötürmə əmsalı 0,35-dir. Hazırlanmış elektrod $0.5\text{--}7.0 \text{ mM}$ intervalda yüksək həssaslıq ($238.7 \text{ }\mu\text{A mM}^{-1} \text{ cm}^{-2}$) və aşağı qeydetmə limiti ($15.0 \text{ }\mu\text{M}$) nümayiş etdirmişdir [30]. S. Ramaprabhu və əməkdaşları maqnetik nüvə-örtük quruluşlu $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ nanohissəcikləri ilə dekorasiya olunmuş ÇKNB nanokompozitindən istifadə edərək amperometrik qlükoza biosensörü hazırlamışlar. Fe_3O_4 nanohissəcikləri biouyğun SiO_2 ilə sadə

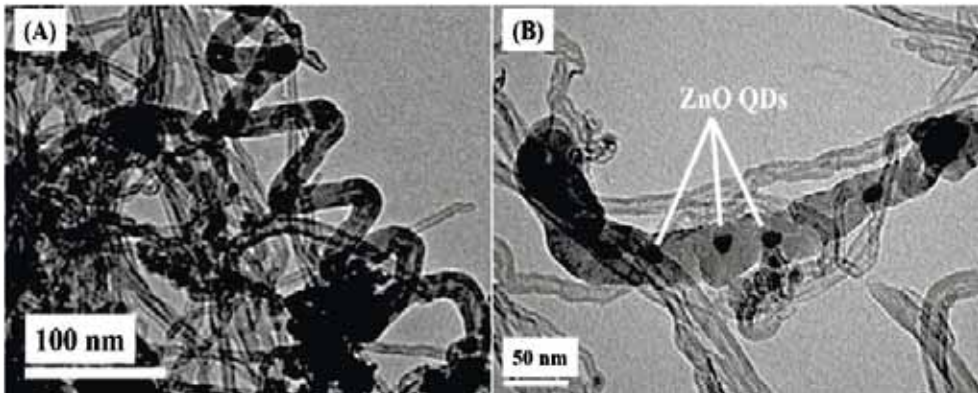
kimyəvi reduksiya metodundan istifadə edilərək biricins örtülmüşdür. Amperometrik biosensor nafionda həll olunmuş $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2/\text{ÇKNB}$ ilə modifikasiya olunmuş şüşə karbon elektrodun səthinə qlükoza oksidazının (QOD) çökdürülməsi ilə hazırlanmışdır. Nafionda həll olunmuş ÇKNB-dən formalaşan təbəqələr daha biricins və stabildir. Şəkil 1 elektrodun hazırlanmasının sxematik təsvirini göstərir. Biosensorun yüksək həssaslıq ($58.9 \mu\text{A}/\text{mM sm}^2$) və əla qeydetmə limitinə (800nM) malik olması qida sənayesində potensial tətbiqini mümkün edir [31].



Şək. 1. QOD/ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2/\text{ÇKNB}/\text{ŞK}$ elektrodun hazırlanmasının sxematik təsviri [31].

4. ZnO/KNB əsaslı biosensorlar. M.Tak və əməkdaşları ZnO və ÇKNB-dən ibarət hibrid nanokompoziti indium qalay oksidlə (İQO) örtülmüş şüşə üzərində kimyəvi üsulla çökdürməklə karbamid biosensoru kimi tətbiq etmişlər. Ureaza karbamidin qeyd edilməsi üçün xüsusi bir ferment olaraq istifadə edilmiş və hibrid nanokompozit matris əsaslı (ZnO-ÇKNB/İQO) elektrodun səthi üzərinə fiziki olaraq immobilizasiya edilmişdir. Nanokompozit əsaslı bioelektrod təkcə ZnO-dan ibarət bioelektrodlə müqayisədə daha yaxşı sensorluq xüsusiyyətlərə malik olmuşdur. Bu bioelektrod çox yüksək həssaslıq ($43.02 \mu\text{A mM}^{-1} \text{sm}^{-2}$) nümayiş etdirərək 4 aydan sonra aktivliyinin 92%-ni saxlamışdır [32]. Digər bir tədqiqat işində isə [33] onlar həmin nanokompozit əsaslı elektrokimyəvi DNA biosensoru meningit xəstəliyinin aşkarlanması üçün istifadə etmişlər. P.N.Manikandan və əməkdaşları tərəfindən ZnO, ÇKNB (funksionallaşmış: f ÇKNB və təmizlənmiş: t ÇKNB) və polivinilxloriddən (PVX) ibarət üçlü kompozitlə modifikasiya olunmuş şüşə karbon elektrod qlükoza sensoru kimi istifadə olunmuşdur. Bu iki kompozit içərisində PVX-ZnO-t ÇKNB pH=7.4 qiymətində qlükoza üçün yüksək aktivlik göstərmişdir [34]. P.Supraja və kolleqaları ZnO nanoliflər daxil edilmiş ÇKNB əsaslı bio-

sensoru atrazinin elektrokimyəvi qeyd edilməsi üçün istifadə etmişlər. Atrazin (1-xlor-3-etilamin-5-izopropilamin-s-triazin; ATZ) məhsullarda yüksək səmərəliliyinə görə triazin ailəsinin ən çox istifadə olunan pestisididir. ÇKNB-ZnO nanoliflərinin yüksək keçiricilik və səth sahəsinə, qadağan olunmuş zonanın aşağı qiymətə malik olması səbəbindən $10 \text{ zM}^{-1} \mu\text{M}$ geniş qeydetmə intervalında sensor $21.61 (\text{K}\Omega\mu\text{g}^{-1} \text{mL}^{-1}) \text{ sm}^{-2}$ həssaslığa və 5.368 zM qeydetmə limitinə malik olmuşdur [35]. V.Vinoth və işçi qrupu kimyəvi çökdürmə üsulu ilə sintez olunmuş ZnO kvant nöqtələr ilə ÇKNB-nin kompozitini qeyri-fermentativ qlükoza sensoru kimi istifadə etmişlər. Işıqburaxan elektron mikroskop nəticələrinə əsasən sferikə-bənzər ZnO kvant nöqtələrin diametri təqribən 3-8 nm intervalındadır (şəkil 2). ÇKNB/ZnO nanokompozitinin elektrokimyəvi xassələri təmiz ZnO və ÇKNB ilə müqayisədə əhəmiyyətli dərəcədə artmışdır. Nəticələr göstərmişdir ki, bu nanokompozit əsasında hazırlanmış biosensor $9.36 \mu\text{A} \mu\text{M}^{-1}$ həssaslığa malikdir. Qeydetmə limiti $0.208 \mu\text{M}$ müəyyən edilmiş və cavab müddəti 3 san-dən az olmuşdur [36].



Şək. 2. (A & B) ÇKNB/ZnO nanokompozitinin TEM təsvirləri [36].

5.Nəticə. Təqdim olunan qısa icmal məqalə oksid nanohissəcikləri ilə modifikasiya olunmuş karbon nanoboru əsaslı elektrokimyəvi biosensorların hazırlanması və xassələri haqqındadır. Elektrokimyəvi biosensordlarda KNB-lər iki məqsədlə istifadə oluna bilər: biomolekullar üçün immobilizasiya dəstəyi rolunu oynayır və elektrokimyəvi transduksiya üçün lazımi elektrik keçiriciliyini təmin edir. Hədəf molekulun tipindən asılı olaraq sensor cihazın dizaynı üçün fərqli strategiyalar tətbiq oluna bilər. Müxtəlif forma və quruluşlu keçid metal oksid nanohissəcikləri müxtəlif üsullardan istifadə edilərək sintez edilmişdir. Bu metal oksid nanohissəcikləri ölçü, forma, stabillik və daha böyük səth sahəsinə görə yaxşı elektrik və fotokatalitik xüsusiyyətlərə malikdir. Məqalədə, həmçinin sensorların dayanıqlılığı, həssaslığı, qeydetmə limiti və seçiciliyi müzakirə olunmuşdur.

ƏDƏBİYYAT

1. Spets J.P., Lampinen M.J., Kiros Y., Rantanen J., Anttila T. Direct glucose fuel cell with the anion exchange membrane in the near-neutral-state electrolyte. (2012), *Int. J. Electrochem. Sci.*, 7, 11696.
2. Chen Y., Prasad K.P., Wang X., Pang H., Yan R., Than A., Chan-Park M.B., Chen P. Enzymeless multi-sugar fuel cells with high power output based on 3D graphene-Co₃O₄ hybrid electrodes. (2013), *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 15, 9170–9176.
3. Moehlenbrock M.J., Minteer S.D. Extended lifetime biofuel cells. (2008) *Chem. Soc. Rev.*, 37, 1188–1196.
4. Cooney M.J., Svoboda V., Lau C., Martin G., Minteer S.D. Enzyme catalysed biofuel cells. (2008), *Energy Environ. Sci.* 1, 320–337.
5. Liu Y., Higgins D.C., Wu J., Fowler M., Chen Z. Cubic spinel cobalt oxide/multi-walled carbon nanotube composites as an efficient bifunctional electrocatalyst for oxygen reaction. (2013), *Electrochem. Commun.*, 34, 125–129.
6. Elouarzaki K., Le Goff A., Holzinger M., They J., Cosnier S. Electrocatalytic oxidation of glucose by rhodium porphyrin-functionalized MWCNT electrodes: application to a fully molecular catalyst-based glucose/O₂ fuel cell. (2012), *J. Am. Chem. Soc.* 134, 14 078–14 085.
7. Zhao Y., Fan L., Gao D., Ren J., Hong B. High-power non-enzymatic glucose biofuel cells based on three-dimensional platinum nanoclusters immobilized on multiwalled carbon nanotubes. (2014), *Electrochim. Acta*, 145, 159–169.
8. Chu M., Zhang Y., Yang L., Tan Y., Deng W., Ma M., Su X., Xie Q., Yao S. A compartment-less nonenzymatic glucose–air fuel cell with nitrogen-doped mesoporous carbons and Au nanowires as catalysts. (2013) *Energy Environ. Sci.* 6, 3600–3604.
9. Ci S., Wen Z., Mao S., Hou Y., Cui S., He Z., Chen J. One-pot synthesis of high-performance Co/graphene electrocatalysts for glucose fuel cells free of enzymes and precious metals. (2015) *Chem. Commun.*, 51, 9354–9357.
10. Slaughter G., Kulkarni T. Fabrication of palladium nanowire array electrode for biofuel cell application. (2016), *Microelectron. Eng.* 149, 92–96.
11. Yang L., Zhang Y., Chu M., Deng W., Tan Y., Ma M., Su X., Xie Q., Yao S. Facile fabrication of network film electrodes with ultrathin Au nanowires for nonenzymatic glucose sensing and glucose/O₂ fuel cell. (2014), *Biosens. Bioelectron.* 52, 105–110.
12. Lin Y., Ren J., Qu X. Nano-gold as artificial enzymes: hidden talents. (2014) *Adv. Mater.* 26, 4200–4217.
13. Zhang E., Xie Y., Ci S., Jia J., Wen Z. Porous Co₃O₄ hollow nanododecahedra for nonenzymatic glucose biosensor and biofuel cell. (2016), *Biosens. Bioelectron.* 81, 46–53.
14. Liu X.W., Pan P., Zhang Z.M., Guo F., Yang Z.C., Wei J., Wei Z. Ordered self-assembly of screen-printed flower-like CuO and CuO/MWCNTs modified graphite electrodes and applications in non-enzymatic glucose sensor. (2016), *J. Electroanal. Chem.*, 763, 37–44.
15. Gu J., Zhang Y.W., Tao F. Shape control of bimetallic nanocatalysts through well-designed colloidal chemistry approaches. (2012), *Chem. Soc. Rev.* 41, 8050–8065.
16. Liang Y., Li Y., Wang H., Zhou J., Wang J., Regier T., Dai H. Co₃O₄ nanocrystals on graphene as a synergistic catalyst for oxygen reduction reaction. (2011), *Nat. Mater.* 10, 780–786.
17. Xie X., Li Y., Liu Z.Q., Haruta M., Shen W. Low-temperature oxidation of CO catalysed by Co₃O₄ nanorods. (2009), *Nature*, 458, 746–749.
18. Xie X., Shen W. Morphology control of cobalt oxide nanocrystals for promoting their catalytic performance. (2010), *Nanoscale*, 1, 50–60.
19. Lu H., Huang Y., Yan J., Fan W., Liu T. Nitrogen-doped graphene/carbon nanotube/Co₃O₄ hybrids: one-step synthesis and superior electrocatalytic activity for the oxygen reduction reaction. (2015), *Rsc Adv.*, 5, 94615–94 622.

20. Guo S., Dong S. Graphene nanosheet: synthesis, molecular engineering, thin film, hybrids, and energy and analytical applications. (2011), *Chem. Soc. Rev.* 40, 2644.
21. Sgobba V., Guldi D.M. Carbon nanotubes—electronic/electrochemical properties and application for nanoelectronics and photonics. (2009), *Chem. Soc. Rev.*, 38, 165–184.
22. Eder D. Carbon nanotube—inorganic hybrids. (2010), *Chem. Rev.*, 110, 1348–1385.
23. Liang Y. Oxygen reduction electrocatalyst based on strongly coupled cobalt oxide nanocrystals and carbon nanotubes. (2012), *J. Am. Chem. Soc.* 134, 15 849–15 857.
24. Jiao K, Jiang Y, Kang Z, Peng R, Jiao S, Hu Z. Three-dimensional Co₃O₄@MWNTs nanocomposite with enhanced electrochemical performance for nonenzymatic glucose biosensors and biofuel cells. (2017), *R. Soc. open sci.*, 4: 170991.
25. Liaqat I., Iqbal N., Aslam M., Nasir M., Hayat A., Han D.X., Niu L., Nawaz M. H. Co₃O₄ nanocubes decorated single walled carbon nanotubes for efficient electrochemical non enzymatic glucose sensing. (2020), *SN Applied Sciences* 2:1756.
26. Lin X., Wang Y., Zou M., Lan T., Ni Y. Electrochemical non-enzymatic glucose sensors based on nano-composite of Co₃O₄ and multiwalled carbon nanotube. (2019), *Chinese Chemical Letters*, 30 1157–1160.
27. Wang S., Zhang X., Huang J., Chen J.. High-performance non-enzymatic catalysts based on 3D hierarchical hollow porous Co₃O₄ nanododecahedras in situ decorated on carbon nanotubes for glucose detection and biofuel cell application. (2018), *Analytical and Bio-analytical Chemistry*, 410(7): 2019-2029.
28. Kundu M., Bhardwaj H., Pandey M. K., Krishnan P., Kotnala R. K., Sumana G. Development of electrochemical biosensor based on CNT–Fe₃O₄ nanocomposite to determine formaldehyde adulteration in orange juice. (2019), *J. Food Sci Technol.* 56(4):1829–1840.
29. Zhang W. Application of Fe₃O₄ nanoparticles functionalized carbon nanotubes for electrochemical sensing of DNA hybridization. (2016), *Journal of Applied Electrochemistry*, 46,559–566
30. Masoomi-Godarzi S., Khodadadi A. A., Vesali-Naseh M., Mortazavi Y. Highly Stable and Selective Non-Enzymatic Glucose Biosensor Using Carbon Nanotubes Decorated by Fe₃O₄ Nanoparticles. (2014), *Journal of The Electrochemical Society*, 161 (1) B19-B25
31. Baby T. T., Ramaprabhu S. SiO₂ coated Fe₃O₄ magnetic nanoparticles dispersed multiwalled carbon nanotubes based amperometric glucose biosensor. (2010), *Talanta*, 80 2016–2022.
32. Tak M., Gupta V., Tomar M. Zinc oxide–multiwalled carbon nanotubes hybrid nanocomposite based urea biosensor. (2013), *J. Mater. Chem. B*, 1, 6392–6401.
33. Tak M., Gupta V., Tomar M. ZnO-CNT nanocomposite based electrochemical DNA biosensor for Meningitis detection. *RSC Adv.*, (2016), 6, 76214-76222.
34. Manikandan P. N., Imran H., Dharuman V. Direct glucose sensing and biocompatible properties of zinc oxide- multiwalled carbon nanotube-poly(vinyl chloride) ternary composite. (2016), *Anal. Methods* 8, 2691-2697.
35. Supraja P., Singh V., Krishna S. R., Singh S. G. Electrospun CNT embedded ZnO nanofiber based biosensor for electrochemical detection of Atrazine: a step closure to single molecule detection. (2020), *Microsystems & Nanoengineering*, 6, 3.
36. Vinoth V., Subramaniyam G., Anandan S., Vald'es H., Manidurai P. Non-enzymatic glucose sensor and photocurrent performance of zinc oxide quantum dots supported multiwalled carbon nanotubes. (2021), *Materials Science and Engineering B*, 265 115036.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ БИОСЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ОКСИДНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

С.Дж.МАМЕДЪЯРОВА, С.Г.НУРИЕВА, А.М.РАХИМЛИ

РЕЗЮМЕ

Разработка новых электрохимических сенсоров, использующих превосходные свойства наноматериалов, привлекает значительное внимание в исследовательских областях. Из-за своего небольшого размера, цилиндрической формы, отношения поверхности к объему, высокой проводимости и хорошей биосовместимости, углеродные нанотрубки (УНТ) широко изучались и использовались для производства электрохимических биосенсоров. Эта небольшая статья посвящена разработке и свойствам электрохимических биосенсоров на основе углеродных нанотрубок, модифицированных оксидными наночастицами.

Ключевые слова: углеродная нанотрубка, биосенсор, оксидная наночастица

ELECTROCHEMICAL BIOSENSORS BASED ON CARBON NANOTUBES MODIFIED WITH OXIDE NANOPARTICLES

S.J.MAMMADYAROVA, S.G.NURIYEVA, A.M.RAHIMLI

SUMMARY

The development of new electrochemical sensors using the superior properties of nanomaterials is attracting significant attention in research areas. Due to their small size, cylindrical shape, surface-to-volume ratio, high conductivity, and good biocompatibility, carbon nanotubes (CNT) have been widely studied and used in order to make electrochemical biosensors. The presented brief review article is about the development and properties of electrochemical biosensors based on carbon nanotubes modified with oxide nanoparticles.

Keywords: carbon nanotube, biosensor, oxide nanoparticle