Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine

J Chem Good Trad Med, Volume 4, Issue 4, 2025 Chemistry of Goods

GAZ SEENSORLARI UCHUN O‘TKAZUVCHAN POLIMERLAR VA METALL OKSIDLI NANOKOMPOZITLI MATERIALLAR SINTEZI VA RENTGEN-DIFRAKTOMETRIK TAHLILI

Otabek Artikovich Kuchkarov
Samarqand davlat pedagogika instituti, Kimyo kafedrasi v.b dotsenti PhD
https://orcid.org/0000-0002-6692-9352
E-mail: o-kuchkarov2018@mail.ru

DOI: https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol4.iss4.2025.548

Kalit so'zlar:
Polianilin, volfram oksidi, qalay oksidi, trietil amin, yarim o‘tkazgich, gazga sezgir material, sensor

Annotatsiya
Polianalin-metall oksidli gibrid nanokompozitlarning moslashuvchan plyonkalari oksidlovchi vosita sifatida ammoniy persulfat (APS) va HCl ishtirokida anilinning oksidlanish-qaytarilish jarayonidan foydalangan holda kimyoviy sintez qilindi. PANI/WO_3 nanokompozitining monoklinik WO_3 oksididan hosil bo’lganligini tasdiqlandi. PANI/SnO_2 nanokompozitining rentgen spektri standart SnO_2 oksidining rentgen difraktogrammasi bilan solishtirganda nisbatan cho‘qqilarning kengayganligini kuzatildi. PANI matrisasi tufayli SnO_2 oksidining xarakterli cho‘qqilarining ko‘proq qismi amorf tabiatga ega ekanliligi aniqlandi. Trietilamin sensorini gazgsezgir material sifatida PANI/(WO_3+SnO_2) kompozit materilli ekanligi aniqlandi.

Havola uchun
Kuchkarov, O. A (2025). GAZ SEENSORLARI UCHUN O‘TKAZUVCHAN POLIMERLAR VA METALL OKSIDLI NANOKOMPOZITLI MATERIALLAR SINTEZI VA RENTGEN-DIFRAKTOMETRIK TAHLILI. Tovarlar Kimyosi Va Xalq Tabobati Jurnali, 4(4), 66-86. https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol4.iss4.2025.548

Kirish. O‘tkazuvchan polimerlar yarimo‘tkazgichli sensorlar ishlab chiqarishda qo‘llanilishi mumkin bo‘lgan eng istiqbolli materiallardan biridir. Ulardan plyonkalar ishlab chiqarish arzon va yengil tayyorlanishi mumkin. Bu esa sensorlar tayyorlash uchun qulay. Asosan, polimerlar yupqa plyonkalar shaklida qo’llaniladi, ularning asosiy vazifasi sensorli qurilmaning sezgirligini oshirishdir [1]. Umuman olganda, polimerlar xona haroratida ishlashi mumkin bo’lgan barcha turdagi sensorlarda ishlatilishi mumkin. Dopant turini va miqdorini o‘zgartirib, izolyatorlardan yarim o‘tkazgichlargacha bo’lgan keng elektr xususiyatlariga ega polimerlarni olish mumkin [2].

Polipirol (PPy), polianilin (PANI), politiofen (PTh) va ularning hosilalari kabi elektr o‘tkazuvchan polimerlar 1980 yillarning boshidan beri gaz sensorlarida sezgir qatlamlar sifatida ishlatilib kelinmoqda [3]. Gaz analizatorlari uchun o‘tkazuvchan polimerlardan foydalanish uzoq vaqtdan beri muhim tadqiqot mavzusi bo’lib kelgan. Ushbu polimerlarni sintez qilish qulayligi va xona haroratidagi sezgirligi sensorning afzalliklarini oshiradi[4].

Yarim o’tkazuvchan polimerlarga asoslangan gaz sensorlarning ishlash prinsipi asosan elektr o’tkazuvchanlikni o’lchashga asoslangan. Polianilin plyonkalarining gaz muhitidagi elektr o’tkazuvchanligi gazsimon ammiakning konsentrasiyasiga bog’liq. Ular kimyoviy yoki elektrokimyoviy sensorlarni ishlab chiqish uchun yaxshi materiallardir[5].

Metall oksidli gaz sensorlari ancha arzon, mustahkam, yengil, uzoq muddatli va material signalning tezkorligi kabi afzalliklariga ega. Metall oksidli sensorlar yordamida gazlarni aniqlash bugungi kunda katta ahamiyatga ega. Ammo yuqori haroratlarda (300-500 ^{0}C) ishlash zarurati ko’pincha bu turdagi sensorlardan foydalanishni cheklaydi [6]. Shunday qilib, nano o’lchamli metall

oksidlari va o'tkazuvchan polimerlarning kombinasiyasi yuqoridagi muammolarni hal qilishda samarali yondashuv hisoblanadi. Nanometr o'lchamlari tufayli to'ldiruvchi dispersiyaga ega nanokompozitlar sof polimerlar yoki ularning an'anaviy kompozisiyalari bilan solishtirganda sezilarli darajada yaxshilangan xususiyatlarni ko'rsatadi. Bularga modul va quvvatni oshirish, to'siqni yo'qotish xususiyatlari, yaxshilangan erituvchanlik, termik barqarorlik kabilar kiradi [7].

Gaz seensorlari uchun o'tkazuvchan polimerlar va metall oksidli nanokompozitli materiallar sintez qilish kam o'rganilgan soha degan xulosaga kelishimiz mumkin. Shuning uchun volfram, titan, polianilin va metall oksidlari asosida sensorlar yaratish qonuniyatlarini o'rganish va ularning rentgen difraktogrammasi tahlil qilish ham nazariy, ham amaliy ahamiyatga ega hisoblanadi.

Tajriba qismi va natijalar muhokamasi.

Volfram oksidi nanozarachalarini zol-gel usuli yordamida tayyorlash. 35 ml 0,15 M natriy volframat eritmasiga (Na_2WO_4), 25 ml 3 M nitrat kislota eritmasidan (HNO_3) magnitli aralashtirgich yordamida kuchli aralashtirilgan holda tomchilab qo'shildi. Hosil bo'lgan sariq cho'kma 30 kun davomida 25 ^{0}C da saqlandi.

WO_3 nanozarachalarini olish uchun ishlatiladigan gel 24 soat davomida 100^{0}C da quritilgan va keyin 400-500 ^{0}C da termik ishlov berildi(1-rasm).



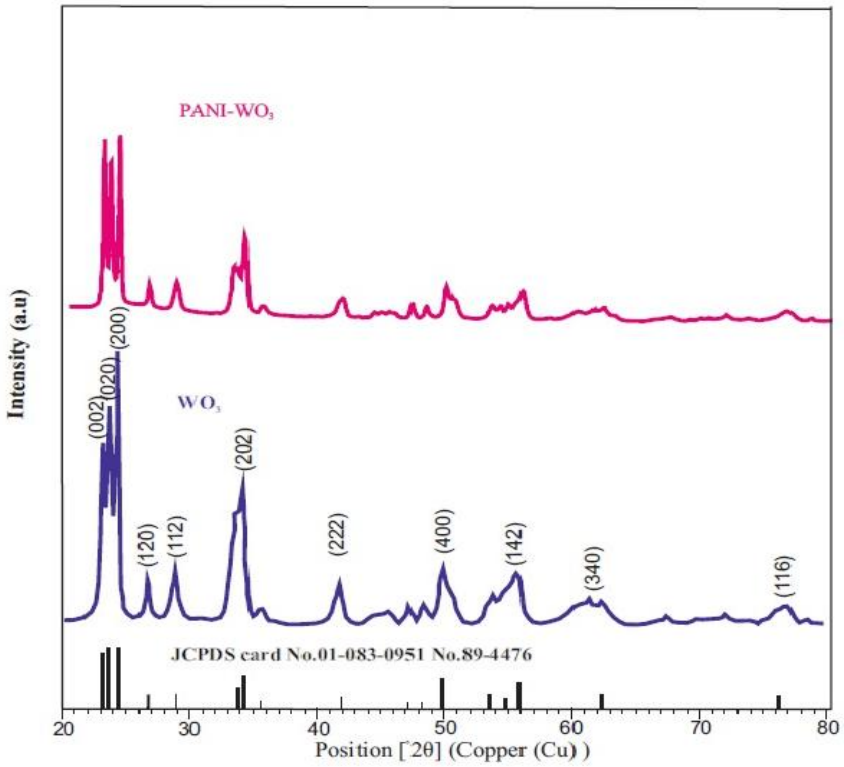
1-rasm. Gel 400-500 ^{0}C da termik ishlov berilib olingan WO_3 nanozarrachalari

PANI-WO_3 nanokompozit plyonkasining sintezi. Polianilin nanozarachalari kimyoviy oksidlanish polimerlash usuli yordamida anilin monomerlaridan sintez qilingan. 0,46 ml anilin (foydalanishdan oldin qayta haydab olingan) va turli massa nisbatda volfram (VI) oksidi (WO_3) (mass %=10, 20, 30, 40 va 50) 25ml 1M HCl eritmasiga qo'shildi va magnitli aralashtirgich 30 minut va ultratovush to'lqinlar bilan 30 minut davomida aralashtirildi. Shu bilan birga, 0.005 mol amoniy persulfat $(NH_4)S_2O_8$/HCl eritmasini olish uchun 30 min davomida kuchli aralashtirilgan holda ma'lum miqdordagi HCl eritmasida eritildi. So'ngra, $(NH_4)S_2O_8$/HCl eritmasi yuqorida olingan eritmaga qo'shildi va xona haroratida 48 soat saqlanib, filtrlab olindi.

Polianilin- WO_3-SnO_2 (PANI/WO_3- SnO_2) sensor plyonkalarini ishlab chiqarish Sintezlangan WO_3 nanozarrachalari SnO_2 nanozarrachalari bilan aralashtirilib, turli xil WO_3-SnO_2 molyar nisbatlarga ega (5:95, 10:90, 15:85, 20:80, 25:85 va 30:70) gomogen eritma olindi. Nihoyat, PANI WO_3:SnO_2 kompozit eritmasiga 2 mol-PANI+1mol(0,5WO_3:0,5SnO_2) nisbatida aralashtirildi. So'ngra hosil bo'lgan kompozit eritmalari sentrifugalash orqali barcha eritmalar uchun 300 nm yupqa plyonka qalinligini saqlagan holda, (korning) shisha substratiga yotqizildi. Tayyorlangan plyonkalar prekursorni bug'lantirish uchun 100 ^{0}C da piroliz jarayoni o'tkazildi. Keyinchalik, tayyorlangan plyonkalar 3 soat davomida 300 ^{0}C da termo ishlov berish orqali barqarorlashtirildi.

2-rasmda polianilin va WO_3 asosida olingan PANI/WO_3 nanokompozitining XRD spektri keltirilgan. Rasmdan polianilin va WO_3 nanokompozitining rentgen (XRD) spektrda: 2θ=23.1°,

23.6°, 24.3°, 26.6°, 28.8°, 33.9°, 34.1°, 35.5°, 41.8°, 47.2°, 48.3°, 49.9°, 53.4°, 54.8° va 62.3° sohalariga mos keluvchi intensiv cho'qilarning mavjudligi hamda Miller indekslariga (002), (020), (200), (120) (112), (022), (220), (222) ega bo'lishi (JCDPD kartasi №71-2141, №83-0950), olingan PANI/WO_3 nanokompozitining monoklinik WO_3 oksididan hosil bo'lganligini tasdiqlaydi[8-9].



2 - rasm. PANI/WO_3 va WO_3 larning rentgenogrammasi

Tadqiqotlar davomida WO_3 nanozarachalarini olish jarayonida namuna 400-500 ^{0}C haroratda 3 soat davomida kuydirilgan. Kuydirish jarayonida haroratni 450 ^{0}C dan oshishi barqaror monoklinik struktura hosil qilishi aniqlangan [8]. Kristallarning o'rtacha o'lchamlari metall oksidi nanostrukturalarining xususiyatlariga ta'sir qiluvchi muhim parametrlardan bo'lib, u Debye-Scherrer formulasi yordamida hisoblanadi.

$$D = k\lambda/(\beta\cos\theta) \qquad (2.2)$$

D-kristallar o'lchami nm, k-0,9 (Scherrer doimiysi), λ-0,15406 nm (rentgen nurlari manbalarining to'lqin uzunligi), β-FWHM (radians) radiandagi difraksiya chiziqlarining yarim kengligi, θ-daraja bo'yicha difraksiya burchagi. Tajribalar davomida polianilin va WO3 nanokompozitining rentgen (XRD) spektrida kuzatilgan asosiy cho'qqilar 23.1°(002), 23.6°(020), 24.3°(200), 26.6°(120) bo'yicha hisoblangan o'rtacha kristall o'lchamlari quyidagi 1-jadvalda keltirilgan. Jadvaldan o'rtacha kristal o'lchamlari aniqlangan asosiy chuqqilarga mos ravishda 35.67, 36.82, 40.42 va 21.27 nm qiymatlarga ega ekanligi aniqlandi.

1-Jadval

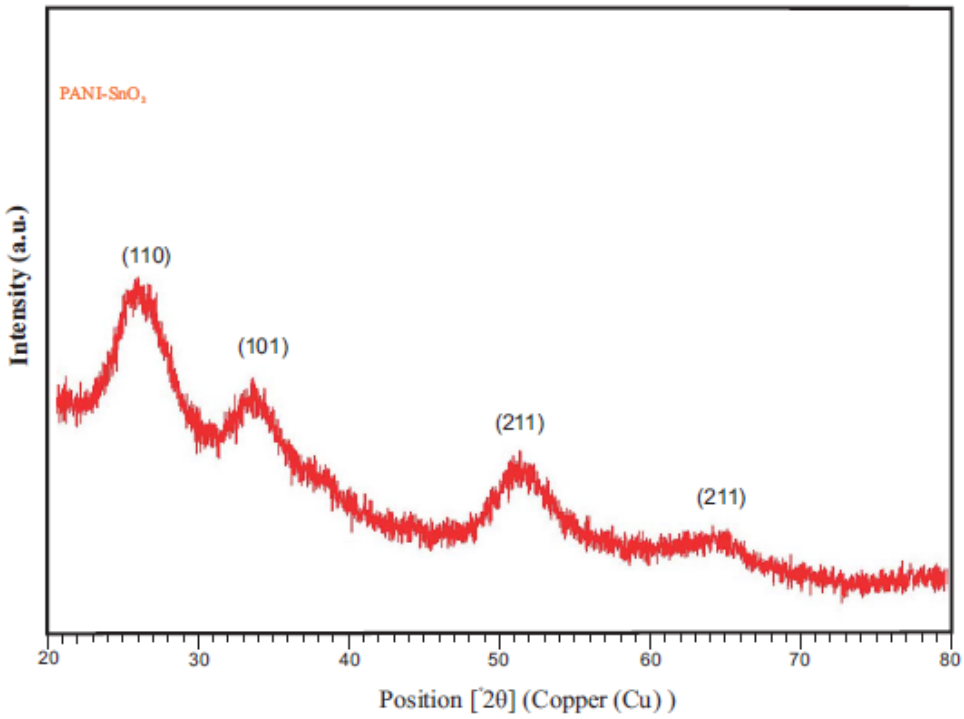
Polianilin va WO_3 nanokompozitining rentgen (XRD) spektrda kuzatilgan asosiy cho'qqilar bo'yicha hisoblangan kristallarning o'rtacha o'lchamlari

Difraksiya burchagi Pos. [°2θ]	Difraksiya cho'qqilarining yarim kengligi FWHM [°2θ]	O'rtacha o'lchami D, nm
23.1	0.2373	35.67
23.6	0.2301	36.82
24.3	0.2099	40.42
26.6	0.4007	21.27

Jadvaldan o'rtacha kristall o'lchamlari aniqlangan asosiy chuqqilarga mos ravishda 35.67, 36.82, 40.42 va 21.27 nm qiymatlarga ega ekanligi aniqlandi.

3-rasmda keltirilgan spektrdan, nanokompozitining 2θ=26.2°, 33.9°, 51.6° sohalariga mos ravishda (110), (101), va (211) cho'qqilarning mavjudligini ko'ramiz (JCDPD kartasi № 41-1445). Bu kristalni oddiy tetragonal tuzilishli ekanligini tasdiqlaydi.

Biroq PANI/SnO_2 nanokompozitining rentgen spektri standart SnO_2 oksidining rentgen difraktogrammasi bilan solishtirganda nisbatan cho'qqilarning kengayganligini kuzatdik [133; 103738 b]. Bu polianilin matrisasida qalay oksidi mavjudligini ko'rsatadi, shuningdek PANI matrisasi tufayli SnO_2 oksidining xarakterli cho'qqilarining ko'proq qismi amorf tabiatga ega ekanliligi aniqlandi.



2.9-rasm. PANI/SnO_2 ning rentgenogrammasi

Bundan tashqari o'rtacha kristall o'lchami Sherer tenglamasi (1) yordamida o'rtacha kristall o'lchami 4.87, 5.07 nm ekanligi aniqlandi (2-jadval).

2-Jadval

PANI/SnO_2 ning Sherer tenglamasi (1) yordamida aniqlangan o'rtacha kristall o'lchami

Difrakssiya burchagi Pos. [°2θ]	Difraksiya cho'qqilarining yarim kengligi FWHM [°2θ]	O'rtacha o'lchami D nm
26.2	1.75	4.87
33.9	1.7	5.07

Trietilaminni aniqlashda sensor ko'rsatkichlarining gaz sezgir material tarkibiga bog'liqligi 3-jadvalda keltirilgan.

3-jadval

Trietilaminni aniqlashda sensor ko'rsatkichlarining gaz sezgir material tarkibiga bog'liqligi n=5, P=0,95.

T/r	Gazsezgir materialning tarkibi	TEA uchun sensor signali, (mV)			Dinamik parametrlar, s		Sezgirlik koeffisiyenti (S)
		x ±Δx	S	Sr*10^2	Signal (t_{90})	Qayta tik-lanish (t_{10})	
1	PANI	6±0,02	0,016	0,27	171	205	1,0
2	PANI+WO_3	27±0,04	0,032	0,12	134	188	5,3
3	PANI+SnO_2	37±0,05	0,04	0,11	89	151	2,4
4	PANI+TiO_2	16±0,03	0,024	0,15	109	163	4,3
5	PANI/(WO_3+SnO_2)	55±0,06	0,048	0,09	51	78	7,9
6	PANI/(WO_3+TiO_2)	42±0,05	0,04	0,10	29	101	8,2
7	PANI/(SnO_2+TiO_2)	49±0,04	0,032	0,07	42	95	7,3

Jadvaldagi ma'lumotlardan TEA ni aniqlashda sensorlarning sezgirligini quyidagi ketma-ketligi kuzatildi: PANI+WO_3+SnO_2 > PANI+SnO_2+TiO_2 >PANI+WO_3+TiO_2 >PANI+SnO_2 >PANI+WO_3 >PANI+TiO_2 >PANI. (Sensorlar 20-30 ^{0}C xona haroratida aminni aniqlashda sezgirligining kamayishi tartibida joylashtirilgan). Ushbu ma'lumotlardan kelib chiqqan holda, trietilaminni aniqlashda PANI/(WO_3+SnO_2) asosidagi sensor eng yaxshi parametr bilan tavsiflanadi. Shu bois keyingi tajribalarda trietilamin sensorini gazgsezgir material sifatida PANI/(WO_3+SnO_2) nanokompoziti tanlab olindi.

Xulosalar

Polianalin-metall oksidli gibrid nanokompozitlarning moslashuvchan plyonkalari oksidlovchi vosita sifatida ammoniy persulfat (APS) va HCl ishtirokida anilinning oksidlanish-qaytarilish jarayonidan foydalangan kimyoviy sintez qilindi.PANI/WO_3 nanokompozitining monoklinik WO_3 oksididan hosil bo'lganligini tasdiqlandi. PANI/SnO_2 nanokompozitining rentgen spektri standart SnO_2 oksidining rentgen difraktogrammasi bilan solishtirganda nisbatan cho'qqilarning kengayganligini kuzatildi. PANI matrisasi tufayli SnO_2 oksidining xarakterli cho'qqilarining ko'proq qismi amorf tabiatga ega ekanliligi aniqlandi. Trietilamin sensorini gazgsezgir material sifatida PANI/(WO_3+SnO_2) kompozit materilli ekanligi aniqlandi.

Ishlab chiqilgan TEA sensorlari aniqligi va takrorlanuvchanligi bo'yicha taniqli xorijiy analoglardan qolishmaydi va xona haroratida havo va texnologik gazlar tarkibidan kontsentrasiyalarning keng oralig'ida TEA ni aniqlashga tavsiya etiladi. Sensor ushbu toifadagi qurilmalar uchun qo'yiladigan GOST talablariga to'liq javob beradi.

Adabiyotlar

1. Giselle Jiménez-Cadena, Jordi Riu and F. Xavier Rius, Gas sensors based on nanostructured materials, Analyst, 2007, 132, – P. 1083–1099

2. Ekarat Detsri, Stephan Thierry Dubas, Interfacial Polymerization of Water- Soluble Polyaniline and Its Assembly Using the Layer-By-Layer Technique, Journal of Metals, Materials and Minerals. Vol.19. -2009. No.1 – P. 39-44,

3.Hua Bai and Gaoquan Shi, Gas Sensors Based on Conducting Polymers, Sensors -2007, 7, – P 267-307.

20. Ghenadii Korotcenkov, Chemical Sensors Comprehensive Sensor Technologies: Volume 4 Solid State Devices, "Chap. 1 - //Introduction to Chemical Sensor Technologies// 2011.– P 1-38.

4. Hatchett DW, Josowicz M., Composites of Intrinsically Conducting Polymers as Sensing Nanomaterials, Chem Review, Volume: 108, Issue: 2, -2008. – P 746-769.

5. George F. Fine, Leon M. Cavanagh, Ayo Afonja and Russell Binions, Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring, Sensors 2010, -P. 5469-5502.

6. Arunkumar Lagashetty and A. Venkataraman, Polymer Nanocomposites, Resonance: Volume 10, Number 7 (2005), – P. 49-57.

7. Séverin N'goran EROI, Aimé Serge Ello, Donourou Diabate, Diby Benjamin Ossonon and Jocelin Martial YaO_3, Catalytic activity of using tungsten oxide with hydrogen peroxide for methyl orange degradation, African Journal of Pure and Applied Chemistry, Vol. 14(4), -P. 69-80, DOI: 10.5897/AJPAC2019.0827

8. R.Hatel, M. Baitoul, Nanostructured Tungsten Trioxide (WO_3): synthesis, structural and morphological investigations, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 1292 (2019) 012014 doi:10.1088/1742-6596/1292/1/012014

9. Abdurakhmanov I. E., Kuchkarov O. A., Abdurakhmanov E. Gas sensitivityspeed of ammonia semiconductor sensors based on metal –oxide films SiO_2/TiO_2+ Fe_2O_3 //Rasayan Journal of chemistry. Vol.13. №. 3. 2020. pp. 1486-1490.doi.org/10.31788/RJC.2020. 1335718.

10. Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine, Vol. 1, Iss. 4 , P. 52-69.

11. Zhai, C.B.; Zhu, M.M.; Jiang, L.N.; Yang, T.Y.; Zhao, Q.; Luo, Y.; Zhang, M.Z. Fast triethylamine gas sensing response properties of nanosheets assembled WO_3 hollow microspheres. Appl. Surf. Sci. 2019, 463, -P. 1078–1084.

12. Ma, Q.; Chu, S.S.; Liu, Y.; Chen, Y.; Song, J.C.; Li, H.; Wang, J.P.; Che, Q.D.; Wang, G.; Fang, Y. Construction of SnS2 /ZIF-8 derived flower-like porous SnO_2/ZnO heterostructures with enhanced triethylamine gas sensing performance. Mater. Lett. 2019, 263, -P. 452–455

Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine

J Chem Good Trad Med, Volume 4, Issue 4, 2025 Chemistry of Goods

СИНТЕЗ И РЕНТГЕНОДИФРАКТОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ И МЕТАЛЛООКСИДНЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ

Отабек Артикович Кучкаров

Самаркандский государственный педагогический институт, Исполняющий обязанности доцента кафедры химии, доктор химических наук

https://orcid.org/0000-0002-6692-9352

E-mail: o-kuchkarov2018@mail.ru

DOI: https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol4.iss4.2025.548

Ключевые слова:

Полианилин, оксид вольфрама, оксид олова, триэтиламин, полупроводник, газочувствительный материал, сенсор

Аннотация

Методом химического синтеза с использованием процесса окисления-восстановления анилина в присутствии персульфата аммония (ПСА) в качестве окислителя и HCl были получены гибкие пленки гибридных нанокомпозитов полианилин-металлооксид. Подтверждено, что нанокомпозит PANI/WO_3 образован из оксида WO_3 моноклинной сингонии. При сравнении рентгеновского спектра нанокомпозита PANI/SnO_2 со стандартной рентгеновской дифрактограммой оксида SnO_2 наблюдалось относительное уширение пиков. Установлено, что большая часть характерных пиков оксида SnO2 обладает аморфной природой благодаря матрице PANI. Определено, что композитный материал PANI/(WO_3+SnO_2) является газочувствительным материалом для сенсора на триэтиламин.

Как цитировать

Кучкаров, О. А. (2025). СИНТЕЗ И РЕНТГЕНОДИФРАКТОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ И МЕТАЛЛООКСИДНЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ. Журнал химии товаров и народной медицины, 4(4), 66-86. https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol4.iss4.2025.548

Введение. Проводящие полимеры являются одними из наиболее перспективных материалов, которые могут использоваться в производстве полупроводниковых сенсоров. Производство пленок из них является недорогим, а сами пленки могут изготавливаться легко, что удобно для приготовления сенсоров. В основном полимеры используются в виде тонких пленок, основная задача которых заключается в повышении чувствительности сенсорного устройства [1]. В целом, полимеры могут использоваться в сенсорах всех типов, способных работать при комнатной температуре. Изменяя тип и количество легирующей добавки, можно получать полимеры с широким спектром электрических свойств от изоляторов до полупроводников [2].

Такие электропроводящие полимеры, как полипиррол (PPy), полианилин (PANI), политиофен (PTh) и их производные, используются в качестве чувствительных слоев в газовых сенсорах с начала 1980-х годов [3]. Использование проводящих полимеров для газоанализаторов уже давно является важной темой исследований. Простота синтеза этих полимеров и их чувствительность при комнатной температуре повышают преимущества сенсора [4].

Принцип работы газовых сенсоров на основе полупроводящих полимеров в основном основан на измерении электропроводности. Электропроводность пленок полианилина в

газовой среде зависит от концентрации газообразного аммиака. Они являются хорошими материалами для разработки химических или электрохимических сенсоров [5].

Металлооксидные газовые сенсоры обладают такими преимуществами, как сравнительно низкая стоимость, прочность, легкость, долговечность и быстрота сигнала. Обнаружение газов с помощью металлооксидных сенсоров имеет большое значение в настоящее время. Однако необходимость работы при высоких температурах (300–500 °C) часто ограничивает использование сенсоров этого типа [6]. Таким образом, комбинация наноразмерных металлооксидов и проводящих полимеров является эффективным подходом к решению вышеуказанных проблем. Благодаря нанометровым размерам наполнителя, нанокомпозиты демонстрируют значительно улучшенные свойства по сравнению с чистыми полимерами или их традиционными композитами. К ним относятся увеличенные модуль упругости и прочность, улучшенные барьерные свойства, повышенная растворимость и термическая стабильность [7].

Можно заключить, что синтез проводящих полимеров и металлооксидных нанокомпозитных материалов для газовых сенсоров является малоизученной областью. Поэтому изучение закономерностей создания сенсоров на основе вольфрама, титана, полианилина и металлооксидов, а также анализ их рентгеновских дифрактограмм имеет как теоретическое, так и практическое значение.

Экспериментальная часть и обсуждение результатов

Приготовление наночастиц оксида вольфрама золь-гель методом.

К 35 мл 0,15 М раствора вольфрамата натрия (Na_2WO_4) при интенсивном перемешивании с помощью магнитной мешалки по каплям добавляли 25 мл 3 М раствора азотной кислоты (HNO_3). Образовавшийся желтый осадок выдерживали в течение 30 суток при 25 °C.

Для получения наночастиц WO_3 использовавшийся гель сушили при 100 °C в течение 24 часов, а затем подвергали термической обработке при 400–500 °C (рис. 1).

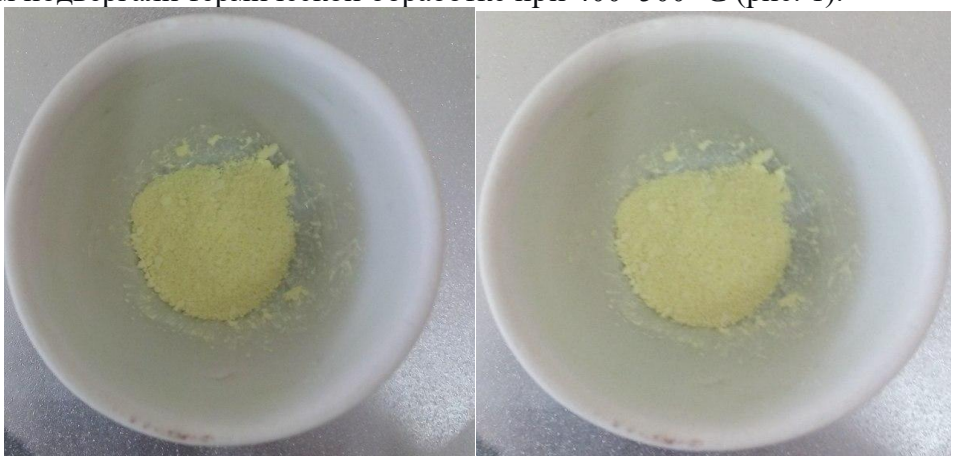


Рис. 1. Наночастицы WO_3, полученные после термической обработки геля при 400–500 °C.

Синтез пленки нанокомпозита PANI-WO_3. Наночастицы полианилина были синтезированы из мономеров анилина методом химической полимеризации окислением. К 25 мл 1 М раствора HCl добавили 0.46 мл анилина (перегнанного перед использованием) и оксид вольфрама(VI) (WO_3) в различных массовых соотношениях (масс. % = 10, 20, 30, 40 и 50). Смесь перемешивали на магнитной мешалке в течение 30 минут и обрабатывали ультразвуком в течение 30 минут. Параллельно, 0.005 моль персульфата аммония ($(NH_4)_2S_2O_8$) растворяли в определенном количестве раствора HCl при интенсивном перемешивании в течение 30 минут для получения раствора $(NH_4)_2S_2O_8$/HCl. Затем этот раствор $(NH_4)_2S_2O_8$/HCl добавили

к полученной ранее смеси и выдерживали при комнатной температуре в течение 48 часов, после чего провели фильтрование.

Изготовление сенсорных пленок полианилин-WO_3-SnO_2 (PANI/WO_3-SnO_2). Синтезированные наночастицы WO_3 смешивали с наночастицами SnO_2 для получения гомогенной смеси с различными мольными соотношениями WO_3:SnO_2 (5:95, 10:90, 15:85, 20:80, 25:75 и 30:70). Наконец, PANI ввели в композитный раствор WO_3:SnO_2 в соотношении 2 моль PANI на 1 моль (0.5 WO_3 : 0.5 SnO_2). Затем полученные композитные растворы наносили центрифугированием на стеклянные подложки (Corning), сохраняя толщину тонкой пленки 300 нм для всех растворов. Приготовленные пленки подвергали пиролизу при 100 °C для удаления летучих предшественников. Впоследствии полученные пленки стабилизировали путем термообработки при 300 °C в течение 3 часов.

На **рис. 2** представлен РФ-спектр нанокомпозита PANI/WO_3 на основе полианилина и WO_3. Из рисунка видно наличие интенсивных пиков, соответствующих углам 2θ = 23.1°, 23.6°, 24.3°, 26.6°, 28.8°, 33.9°, 34.1°, 35.5°, 41.8°, 47.2°, 48.3°, 49.9°, 53.4°, 54.8° и 62.3°, с индексами Миллера (002), (020), (200), (120), (112), (022), (220), (222) (карты JCPDS №71-2141, №83-0950), что подтверждает, что полученный нанокомпозит PANI/WO_3 образован из оксида WO_3 моноклинной сингонии [8-9].

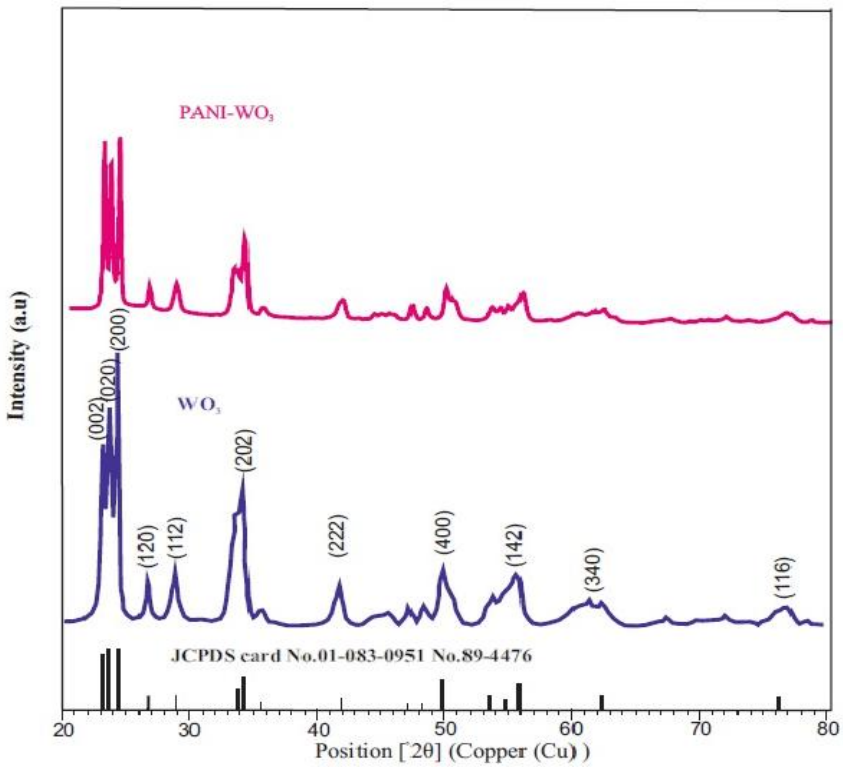


Рис. 2. Рентгенограммы PANI/WO_3 и WO_3.

В ходе исследований в процессе получения наночастиц WO_3 образец прокаливали в течение 3 часов при температуре 400–500 °C. Установлено, что повышение температуры прокаливания выше 450 °C приводит к образованию стабильной моноклинной структуры [8]. Средний размер кристаллитов является важным параметром, влияющим на свойства металлооксидных наноструктур, и рассчитывается по формуле Дебая-Шеррера:

$$\mathbf{D = k\lambda / (\beta\cos\theta)} \quad (1)$$

где:

D - размер кристаллитов, нм;

K = 0,9 (константа Шеррера);

λ = 0,15406 нм (длина волны источника рентгеновского излучения);

β - FWHM (полная ширина на половине максимума) в радианах;

θ - угол дифракции в градусах.

На основе основных пиков, наблюдавшихся в рентгеновском (XRD) спектре нанокомпозита полианилина и WO_3 при 23,1° (002), 23,6° (020), 24,3° (200) и 26,6° (120), были рассчитаны средние размеры кристаллитов, представленные в Таблице 1. Из таблицы видно, что средние размеры кристаллитов, соответствующие основным пикам, составляют 35,67; 36,82; 40,42 и 21,27 нм, соответственно.

Таблица 1.

Средние размеры кристаллитов, рассчитанные по основным пикам, наблюдаемым в рентгеновском (XRD) спектре нанокомпозита полианилина и WO_3.

Угол дифракции Pos. [°2θ]	Полуширина пика дифракции FWHM [°2θ]	Средний размер D, нм
23.1	0.2373	35.67
23.6	0.2301	36.82
24.3	0.2099	40.42
26.6	0.4007	21.27

Из таблицы видно, что средние размеры кристаллитов составляют 35,67, 36,82, 40,42 и 21,27 нм, что соответствует основным выявленным пикам. В спектре, представленном на рис. 3, видны пики (110), (101) и (211), соответствующие областям 2θ = 26,2°, 33,9°, 51,6° нанокомпозита (карточка JCDPD № 41-1445). Это подтверждает простую тетрагональную структуру кристалла.

Однако мы наблюдали относительно уширенный пик в рентгеновском спектре нанокомпозита PANI/SnO_2 по сравнению с рентгеновской дифрактограммой стандартного оксида SnO_2 [133; 103738 b]. Это указывает на присутствие оксида олова в матрице полианилина, а также было обнаружено, что большинство характерных пиков оксида SnO_2 имеют аморфную природу из-за матрицы ПАНИ.

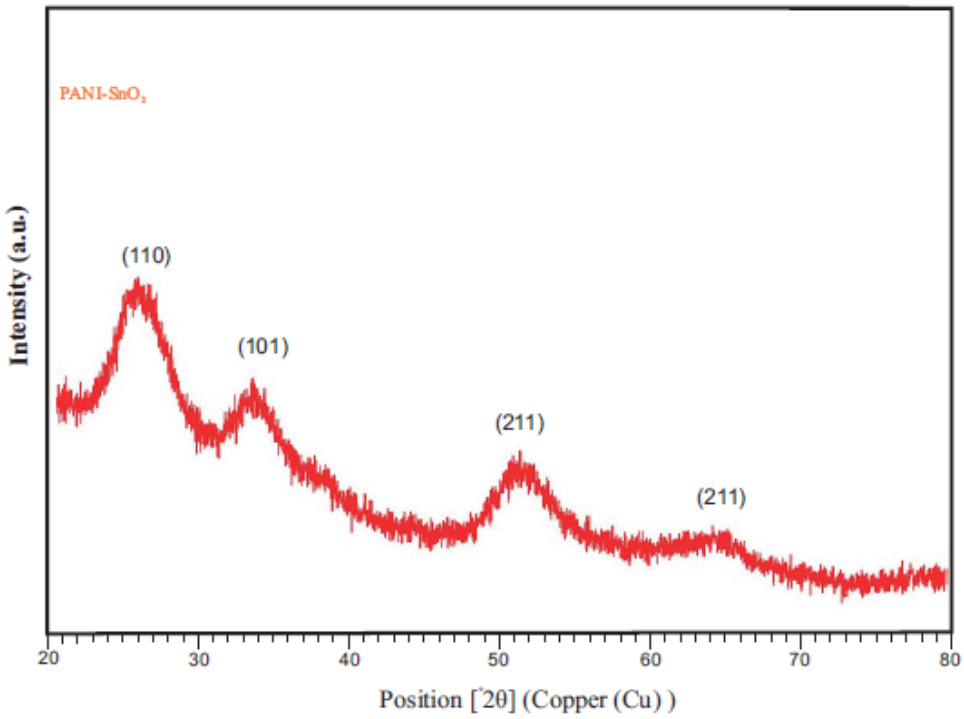


Рисунок 3. Рентгеновская дифракционная картина ПАНИ/SnO2

Кроме того, средний размер кристаллов, определенный с использованием уравнения Шеррера (1), составил 4,87, 5,07 нм (таблица 2).

Таблица 2

Средний размер кристаллов ПАНИ/SnO_2, определенный с использованием уравнения Шеррера (1)

Угол дифракции Pos. [°2θ]	Полуширина пика дифракции FWHM [°2θ]	Средний размер D, нм
26.2	1.75	4.87
33.9	1.7	5.07

Зависимость характеристик сенсора от состава газочувствительного материала для определения триэтиламина представлена в таблице 3.

Таблица 3

Зависимость характеристик сенсора от состава газочувствительного материала для определения триэтиламина n=5, P=0,95.

T/r	Gazsezgir materialning tarkibi	TEA uchun sensor signali, (mV)	Dinamik parametrlar, s		Sezgirlik koeffisiyenti (S)
			Signal		

		x ±Δx	S	Sr*10^2	(t_{90})	Qaytatik-lanish (t_{10})	
1	PANI	6±0,02	0,016	0,27	171	205	1,0
2	PANI+WO_3	27±0,04	0,032	0,12	134	188	5,3
3	PANI+SnO_2	37±0,05	0,04	0,11	89	151	2,4
4	PANI+TiO_2	16±0,03	0,024	0,15	109	163	4,3
5	PANI/(WO_3+SnO_2)	55±0,06	0,048	0,09	51	78	7,9
6	PANI/(WO_3+TiO_2)	42±0,05	0,04	0,10	29	101	8,2
7	PANI/(SnO_2+TiO_2)	49±0,04	0,032	0,07	42	95	7,3

Из данных таблицы следует, что сенсоры для обнаружения ТЭА располагаются в следующем порядке чувствительности: ПАНИ+WO3+SnO2 > ПАНИ+SnO2+TiO2 > ПАНИ+WO_3+TiO_2 > ПАНИ+SnO_2 > ПАНИ+WO_3 > ПАНИ+TiO_2 > ПАНИ. (Сенсоры расположены в порядке убывания чувствительности для обнаружения аминов при комнатной температуре 20-30 ^{0}C). Исходя из этих данных, сенсор на основе ПАНИ/(WO_3+SnO_2) характеризуется наилучшими параметрами для обнаружения триэтиламина. Поэтому в дальнейших экспериментах в качестве газочувствительного материала для сенсора на триэтиламин был выбран нанокомпозит ПАНИ/(WO_3+SnO_2).

Выводы

Гибкие пленки гибридных нанокомпозитов полианилин-оксид металла были химически синтезированы с использованием окислительно-восстановительного процесса анилина в присутствии персульфата аммония (АПС) и HCl в качестве окислителя. Подтверждено, что нанокомпозит PANI/WO3 образован из моноклинного оксида WO3. Рентгеновский спектр нанокомпозита PANI/SnO2 показал относительно уширенную картину пиков по сравнению с рентгеновской дифрактограммой стандартного оксида SnO2. Было обнаружено, что большинство характерных пиков оксида SnO_2 имеют аморфную природу благодаря матрице PANI. Установлено, что газочувствительным материалом триэтиламинового сенсора был композитный материал PANI/(WO_3+SnO_2).

Разработанные сенсоры ТЭА не уступают известным зарубежным аналогам по точности и воспроизводимости и рекомендуются для обнаружения ТЭА в широком диапазоне концентраций в составе воздуха и технологических газов при комнатной температуре. Сенсор полностью соответствует требованиям ГОСТ, предъявляемым к устройствам данной категории.

Литература

1. Giselle Jiménez-Cadena, Jordi Riu and F. Xavier Rius, Gas sensors based on nanostructured materials, Analyst, 2007, 132, – P. 1083–1099

2. Ekarat Detsri, Stephan Thierry Dubas, Interfacial Polymerization of Water- Soluble Polyaniline and Its Assembly Using the Layer-By-Layer Technique, Journal of Metals, Materials and Minerals. Vol.19. -2009. No.1 – P. 39-44,

3.Hua Bai and Gaoquan Shi, Gas Sensors Based on Conducting Polymers, Sensors -2007, 7, – P 267-307.

20. Ghenadii Korotcenkov, Chemical Sensors Comprehensive Sensor Technologies: Volume 4 Solid State Devices, “Chap. 1 - //Introduction to Chemical Sensor Technologies// 2011.– P 1-38.

4. Hatchett DW, Josowicz M., Composites of Intrinsically Conducting Polymers as Sensing Nanomaterials, Chem Review, Volume: 108, Issue: 2, -2008. – P 746-769.

5. George F. Fine, Leon M. Cavanagh, Ayo Afonja and Russell Binions, Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring, Sensors 2010, -P. 5469-5502.

6. Arunkumar Lagashetty and A. Venkataraman, Polymer Nanocomposites, Resonance: Volume 10, Number 7 (2005), – P. 49-57.

7. Séverin N'goran EROI, Aimé Serge Ello, Donourou Diabate, Diby Benjamin Ossonon and Jocelin Martial YaO_3, Catalytic activity of using tungsten oxide with hydrogen peroxide for methyl orange degradation, African Journal of Pure and Applied Chemistry, Vol. 14(4), -P. 69-80, DOI: 10.5897/AJPAC2019.0827

8. R.Hatel, M. Baitoul, Nanostructured Tungsten Trioxide (WO_3): synthesis, structural and morphological investigations, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 1292 (2019) 012014 doi:10.1088/1742-6596/1292/1/012014

9. Abdurakhmanov I. E., Kuchkarov O. A., Abdurakhmanov E. Gas sensitivityspeed of ammonia semiconductor sensors based on metal –oxide films SiO_2/TiO_2+ Fe_2O_3 //Rasayan Journal of chemistry. Vol.13. №. 3. 2020. pp. 1486-1490.doi.org/10.31788/RJC.2020. 1335718.

10. Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine, Vol. 1, Iss. 4 , P. 52-69.

11. Zhai, C.B.; Zhu, M.M.; Jiang, L.N.; Yang, T.Y.; Zhao, Q.; Luo, Y.; Zhang, M.Z. Fast triethylamine gas sensing response properties of nanosheets assembled WO_3 hollow microspheres. Appl. Surf. Sci. 2019, 463, -P. 1078–1084.

12. Ma, Q.; Chu, S.S.; Liu, Y.; Chen, Y.; Song, J.C.; Li, H.; Wang, J.P.; Che, Q.D.; Wang, G.; Fang, Y. Construction of SnS2 /ZIF-8 derived flower-like porous SnO_2/ZnO heterostructures with enhanced triethylamine gas sensing performance. Mater. Lett. 2019, 263, -P. 452–455

Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine

J Chem Good Trad Med, Volume 4, Issue 4, 2025 Chemistry of Goods

SYNTHESIS AND X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS OF PERMEABLE POLYMER AND METAL OXIDE NANOCOMPOSITE MATERIALS FOR GAS SENSORS

Otabek A. Kuchkarov

Samarkand State Pedagogical Institute, Acting Associate Professor of the Department of Chemistry, PhD

https://orcid.org/0000-0002-6692-9352

E-mail: o-kuchkarov2018@mail.ru

DOI: https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol4.iss4.2025.548

Keywords:

Polyaniline, tungsten oxide, tin oxide, triethylamine, semiconductor, gas-sensing material, sensor

Abstract

Flexible films of polyaniline-metal oxide hybrid nanocomposites were chemically synthesised via the oxidation-reduction process of aniline using ammonium persulfate (APS) as an oxidising agent in the presence of HCl. It was confirmed that the PANI/WO_3 nanocomposite was formed from monoclinic WO_3 oxide. The X-ray spectrum of the PANI/SnO_2 nanocomposite exhibited relatively broadened peaks compared to the standard X-ray diffractogram of SnO_2 oxide, indicating that a significant portion of the characteristic SnO_2 peaks became amorphous due to the PANI matrix. The PANI/(WO_3+SnO_2) composite material was identified as a triethylamine-sensitive gas-sensing material.

How to Cite

Kuchkarov, O. A. (2025). SYNTHESIS AND X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS OF PERMEABLE POLYMER AND METAL OXIDE NANOCOMPOSITE MATERIALS FOR GAS SENSORS. Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine, 4(4), 66-86. https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol4.iss4.2025.548

Introduction. Conductive polymers are among the most promising materials that can be used in the production of semiconductor sensors. The production of films from these materials is inexpensive and can be prepared easily and lightly, which is advantageous for sensor fabrication. Primarily, polymers are used in the form of thin films, whose main function is to enhance the sensitivity of the sensing device [1]. In general, polymers can be utilised in all types of sensors capable of operating at room temperature. By varying the type and amount of dopant, it is possible to obtain polymers with a wide range of electrical properties, ranging from insulators to semiconductors [2].

Electrically conductive polymers such as polypyrrole (PPy), polyaniline (PANI), polythiophene (PTh), and their derivatives have been used as sensing layers in gas sensors since the early 1980s [3]. The use of conductive polymers in gas analysers has long been an important research topic. The ease of synthesising these polymers and their sensitivity at room temperature enhance the advantages of the sensor [4].

The operating principle of gas sensors based on semiconducting polymers is primarily based on measuring electrical conductivity. The electrical conductivity of polyaniline films in a gaseous environment depends on the concentration of gaseous ammonia. They are excellent materials for developing chemical or electrochemical sensors [5].

Metal oxide gas sensors offer advantages such as being relatively inexpensive, durable, lightweight, long-lasting, and having fast response signals. Gas detection using metal oxide sensors is of great importance today. However, the necessity to operate at high temperatures (300–500 °C) often limits the use of this type of sensor [6]. Thus, the combination of nanoscale metal oxides and conductive polymers is an effective approach to solving the aforementioned problems. Due to their

nanoscale dimensions, nanocomposites with filler dispersion exhibit significantly improved properties compared to pure polymers or their traditional composites. These improvements include increased modulus and strength, reduced barrier properties, enhanced solubility, and thermal stability [7].

We can conclude that the synthesis of conductive polymers and metal oxide nanocomposite materials for gas sensors is a relatively understudied field. Therefore, investigating the principles of creating sensors based on tungsten, titanium, polyaniline, and metal oxides, along with analyzing their X-ray diffractograms, holds both theoretical and practical significance.

Experimental Section and Discussion of Results

Preparation of tungsten oxide nanoparticles via the sol-gel method. A 25 mL solution of 3 M nitric acid (HNO_3) was added dropwise to 35 ml of a 0.15 M sodium tungstate solution (Na_2WO_4) under vigorous stirring using a magnetic stirrer. The resulting yellow precipitate was aged for 30 days at 25 °C.

To obtain WO_3 nanoparticles, the resulting gel was dried at 100 °C for 24 hours and subsequently subjected to thermal treatment at 400–500 °C (Figure 1).



Figure 1. WO_3 nanoparticles obtained after thermal treatment of the gel at 400–500 °C.

Synthesis of PANI–WO_3 nanocomposite film.

Polyaniline nanoparticles were synthesised from aniline monomers via chemical oxidation polymerisation. 0.46 ml of aniline (redistilled before use) and varying mass ratios of tungsten(VI) oxide (WO_3) (mass% = 10, 20, 30, 40, and 50) were added to 25 ml of a 1 M HCl solution and stirred using a magnetic stirrer for 30 minutes, followed by 30 minutes of ultrasonic treatment. Simultaneously, 0.005 mol of ammonium persulfate ($(NH_4)_2S_2O_8$) was dissolved in a measured quantity of HCl solution under vigorous stirring for 30 minutes to obtain the $(NH_4)_2S_2O_8$/HCl solution. This $(NH_4)_2S_2O_8$/HCl solution was then added to the previously prepared mixture and kept at room temperature for 48 hours, after which it was filtered.

Fabrication of polyaniline–WO_3–SnO_2 (PANI/WO_3–SnO_2) sensor films

The synthesized WO_3 nanoparticles were mixed with SnO_2 nanoparticles to obtain a homogeneous mixture with different WO_3:SnO_2 molar ratios (5:95, 10:90, 15:85, 20:80, 25:75, and 30:70). Finally, PANI was blended into the WO_3:SnO_2 composite solution in a molar ratio of 2 mol PANI to 1 mol (0.5 WO_3:0.5 SnO_2). The resulting composite solutions were then deposited onto glass substrates (Corning) by spin-coating, maintaining a uniform film thickness of 300 nm for all samples. The as-prepared films underwent a pyrolysis process at 100 °C to remove volatile precursors. Subsequently, the films were stabilised by thermal annealing at 300 °C for 3 hours.

The XRD spectrum of the PANI/WO_3 nanocomposite based on polyaniline and WO_3 is presented in Figure 2. The spectrum shows intense diffraction peaks at 2θ = 23.1°, 23.6°, 24.3°, 26.6°, 28.8°, 33.9°, 34.1°, 35.5°, 41.8°, 47.2°, 48.3°, 49.9°, 53.4°, 54.8°, and 62.3°, corresponding to Miller indices (002), (020), (200), (120), (112), (022), (220), and (222) (JCPDS cards No. 71-2141, No. 83-0950). This confirms that the synthesised PANI/WO_3 nanocomposite is formed from monoclinic WO_3 oxide [8–9].

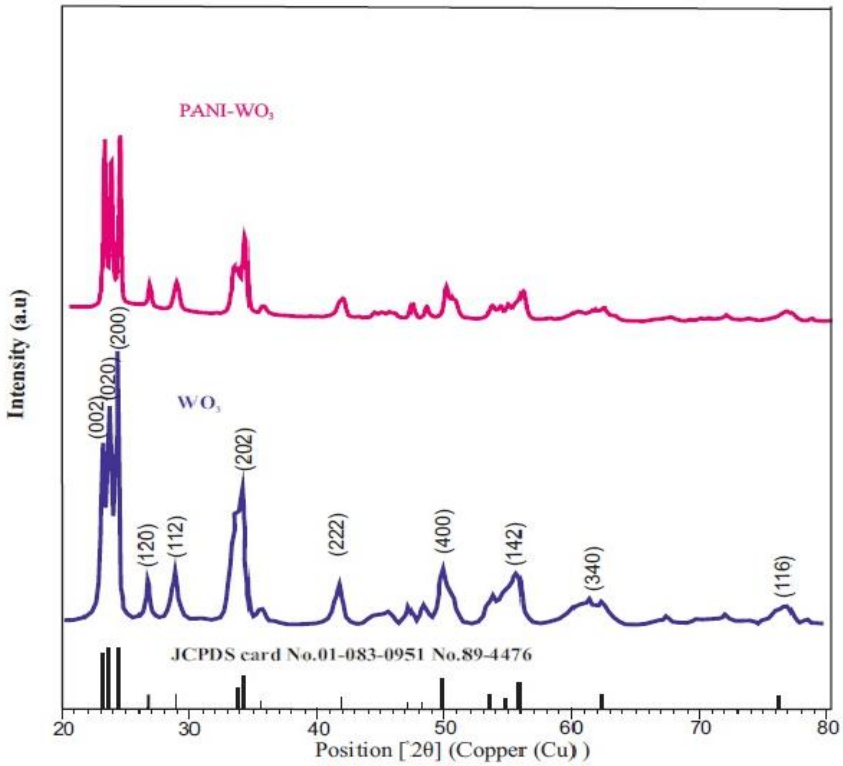


Figure 2. X-ray diffractograms of PANI/WO_3 and WO_3.

During the investigation, the WO_3 nanoparticle synthesis process involved calcination of the sample at 400–500 °C for 3 hours. It was determined that maintaining the calcination temperature above 450 °C leads to the formation of a stable monoclinic structure [8]. The average crystallite size is a crucial parameter influencing the properties of metal oxide nanostructures and was calculated using the Debye–Scherrer formula:

$$\mathbf{D = k\lambda / (\beta \cos\theta)} \quad (1)$$

where:

D = Crystallite size (nm)

K = 0.9 (Scherrer constant)

Λ = 0.15406 nm (X-ray source wavelength)

β = FWHM (full width at half maximum) in radians

θ = Diffraction angle in degrees

Based on the primary peaks observed in the X-ray diffraction (XRD) spectrum of the polyaniline and WO_3 nanocomposite—specifically at 23.1° (002), 23.6° (020), 24.3° (200), and 26.6° (120)—the average crystallite sizes were calculated as presented in Table 1. The results indicate that the average crystallite sizes corresponding to these major peaks are 35.67 nm, 36.82 nm, 40.42 nm, and 21.27 nm, respectively.

Table 1.

Average crystallite sizes calculated from the primary peaks observed in the X-ray diffraction (XRD) spectrum of the polyaniline and WO_3 nanocomposite.

Diffraction Angle Pos. [°2θ]	FWHM of Diffraction Peaks [°2θ]	Average Crystallite Size D (nm)
23.1	0.2373	35.67
23.6	0.2301	36.82
24.3	0.2099	40.42
26.6	0.4007	21.27

Analysis of Table 1 confirmed that the average crystallite sizes corresponding to the identified primary peaks are 35.67 nm, 36.82 nm, 40.42 nm, and 21.27 nm, respectively.

The spectrum presented in Figure 3 reveals the presence of diffraction peaks in the nanocomposite at 2θ = 26.2°, 33.9°, and 51.6°, corresponding to the (110), (101), and (211) planes, respectively (JCPDS card No. 41-1445). This confirms that the crystal possesses a simple tetragonal structure.

However, upon comparing the X-ray spectrum of the PANI/SnO_2 nanocomposite with the standard X-ray diffractogram of SnO_2 oxide, we observed a relative broadening of the peaks. This indicates the presence of tin oxide within the polyaniline matrix. Furthermore, it was determined that a significant portion of the characteristic SnO_2 peaks exhibits an amorphous nature due to the influence of the PANI matrix.

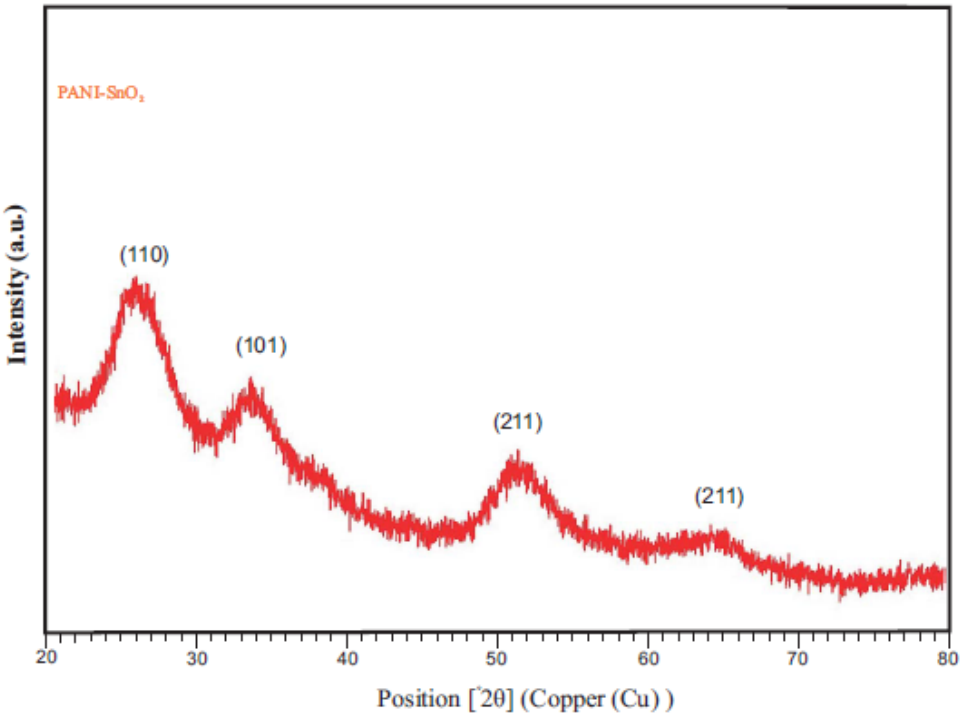


Figure 2.9. X-ray diffractogram of PANI/SnO_2.

Furthermore, the average crystallite size was determined using the Scherrer equation (1), and was found to be 4.87 nm and 5.07 nm, respectively (Table 2).

Table 2.

Diffraction Angle Pos. [°2θ]	**FWHM of Diffraction Peaks [°2θ]**	**Average Crystallite Size D (nm)**
26.2	1.75	4.87
33.9	1.7	5.07

Table 3 presents the dependence of sensor performance indicators on the composition of the gas-sensing material for triethylamine (TEA) detection (n=5, P=0.95).

Table 3.

Dependence of sensor performance indicators on the composition of the gas-sensing material for triethylamine (TEA) detection (n=5, P=0.95).

/r	Composition of Gas-Sensing Material	Sensor Signal for TEA, (mV),			**Dynamic Parameters (s)**		Sensitivity coefficient (S)
		x ±Δx		S r*10^2	**Response Time (t_{90})**	**Recovery Time (t_{10})**	
	PANI	6 ±0,02	0,016	0,27	17 1	20 5	1,0
	PANI+WO_3	27 ±0,04	0,032	0,12	13 4	18 8	5,3
	PANI+SnO_2	37 ±0,05	0,04	0,11	89	15 1	2,4
	PANI+TiO_2	16 ±0,03	0,024	0,15	10 9	16 3	4,3
	PANI/(WO_3+SnO_2)	55 ±0,06	0,048	0,09	51	78	7,9
	PANI/(WO_3+TiO_2)	42 ±0,05	0,04	0,10	29	10 1	8,2
	PANI/(SnO_2+TiO_2)	49 ±0,04	0,032	0,07	42	95	7,3

The data in the table reveal the following order of sensor sensitivity for TEA detection: **PANI/(WO_3+SnO_2) > PANI/(SnO_2+TiO_2) > PANI/(WO_3+TiO_2) > PANI+SnO_2 > PANI+WO_3 > PANI+TiO_2 > PANI.** (Sensors are listed in descending order of their sensitivity for amine detection at a room temperature of 20-30°C).

Based on these results, the sensor based on **PANI/(WO_3+SnO_2)** is characterized by the best overall parameters for TEA detection. Consequently, the **PANI/(WO_3+SnO_2)** nanocomposite was selected as the gas-sensing material for the triethylamine sensor in subsequent experiments.

Conclusions

Flexible films of polyaniline-metal oxide hybrid nanocomposites were synthesized via chemical oxidation polymerization using ammonium persulfate (APS) as an oxidizing agent and HCl, through the oxidation-reduction process of aniline. It was confirmed that the PANI/WO_3 nanocomposite was formed from monoclinic WO_3 oxide. Comparison of the X-ray spectrum of the PANI/SnO_2 nanocomposite with the standard X-ray diffractogram of SnO_2 oxide revealed a relative broadening of the diffraction peaks. This broadening indicated that a significant portion of the characteristic SnO_2 peaks possessed an amorphous nature due to the influence of the PANI matrix. The PANI/(WO_3+SnO_2) composite material was identified as a suitable gas-sensing material for the triethylamine sensor.

The developed TEA sensors are not inferior to renowned foreign counterparts in terms of accuracy and reproducibility, and are recommended for detecting TEA over a wide range of concentrations in air and industrial gases at room temperature. The sensor fully complies with GOST requirements established for devices of this category.

References

1. Giselle Jiménez-Cadena, Jordi Riu and F. Xavier Rius, Gas sensors based on nanostructured materials, Analyst, 2007, 132, – P. 1083–1099

2. Ekarat Detsri, Stephan Thierry Dubas, Interfacial Polymerization of Water- Soluble Polyaniline and Its Assembly Using the Layer-By-Layer Technique, Journal of Metals, Materials and Minerals. Vol.19. -2009. No.1 – P. 39-44,

3.Hua Bai and Gaoquan Shi, Gas Sensors Based on Conducting Polymers, Sensors -2007, 7, – P 267-307.

20. Ghenadii Korotcenkov, Chemical Sensors Comprehensive Sensor Technologies: Volume 4 Solid State Devices, “Chap. 1 - //Introduction to Chemical Sensor Technologies// 2011.– P 1-38.

4. Hatchett DW, Josowicz M., Composites of Intrinsically Conducting Polymers as Sensing Nanomaterials, Chem Review, Volume: 108, Issue: 2, -2008. – P 746-769.

5. George F. Fine, Leon M. Cavanagh, Ayo Afonja and Russell Binions, Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring, Sensors 2010, -P. 5469-5502.

6. Arunkumar Lagashetty and A. Venkataraman, Polymer Nanocomposites, Resonance: Volume 10, Number 7 (2005), – P. 49-57.

7. Séverin N’goran EROI, Aimé Serge Ello, Donourou Diabate, Diby Benjamin Ossonon and Jocelin Martial YaO_3, Catalytic activity of using tungsten oxide with hydrogen peroxide for methyl orange degradation, African Journal of Pure and Applied Chemistry, Vol. 14(4), -P. 69-80, DOI: 10.5897/AJPAC2019.0827

8. R.Hatel, M. Baitoul, Nanostructured Tungsten Trioxide (WO_3): synthesis, structural and morphological investigations, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 1292 (2019) 012014 doi:10.1088/1742-6596/1292/1/012014

9. Abdurakhmanov I. E., Kuchkarov O. A., Abdurakhmanov E. Gas sensitivityspeed of ammonia semiconductor sensors based on metal –oxide films SiO_2/TiO_2+ Fe_2O_3 //Rasayan Journal of chemistry. Vol.13. №. 3. 2020. pp. 1486-1490.doi.org/10.31788/RJC.2020. 1335718.

10. Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine, Vol. 1, Iss. 4 , P. 52-69.

11. Zhai, C.B.; Zhu, M.M.; Jiang, L.N.; Yang, T.Y.; Zhao, Q.; Luo, Y.; Zhang, M.Z. Fast triethylamine gas sensing response properties of nanosheets assembled WO_3 hollow microspheres. Appl. Surf. Sci. 2019, 463, -P. 1078–1084.

12.Ma, Q.; Chu, S.S.; Liu, Y.; Chen, Y.; Song, J.C.; Li, H.; Wang, J.P.; Che, Q.D.; Wang, G.; Fang, Y. Construction of SnS2 /ZIF-8 derived flower-like porous SnO_2/ZnO heterostructures with enhanced triethylamine gas sensing performance. Mater. Lett. 2019, 263, -P. 452–455