

3.3.3. Фотоелектричні сенсори

Принцип роботи сенсорів фотоелектричного типу полягає в генерації фотоносіїв під дією світлового потоку і розділенні внутрішнім полем р-n переходу, що призводить до утворення різниці потенціалів, що називається фото-ЕРС.

Характеристики фотоелектричних сенсорів (табл. 3.5) на основі SiNWs досліджувалися на основі побудованих графіків залежності напруги розімкнутого кола $U_{рк}$ (рис. 3.8) та густини струму короткого замикання $J_{кз}$ (рис. 3.9) від потужності сонячного випромінювання, та було розраховано коефіцієнт фоточутливості сенсорів в фотогенераторному режимі за формулою (3.3). Також було розраховано відносну зміну напруги розімкнутого кола (3.4).

Таблиця 3.5 – Фоточутливі характеристики сенсорів освітленості фотоелектричного типу

№ зразку	1	2	3	4	5	6	7	8	100
$U_{рк}$, мВ	448	383	356	395	331	445	497	282	418
$J_{кз}$, мА/см ²	10,3	6,2	3,1	6,4	11,8	5,7	6,4	3,7	4,6
$K_{ф}$, мА/Вт	116	80,0	40	83	147	65	72	39	39
$\delta U_{рк}$, %	22,8	25,0	29,2	28,1	37,6	22,9	19,4	32,5	21,5
№ зразку	101	102	104	105	109	110	111	112	113
$U_{рк}$, мВ	439	476	503	301	406	398	501	323	393
$J_{кз}$, мА/см ²	7,8	20,9	1,7	4,3	14,2	10,9	6,0	1,3	5,4
$K_{ф}$, мА/Вт	86	203	19	43	134	110	67	13	62
$\delta U_{рк}$, %	35,6	19,4	10,0	86,1	14,5	38,2	8,1	34,5	38,5

$$K_{\phi} = \frac{j_{кз2} - j_{кз1}}{p_2 - p_1}, \quad (3.3)$$

де $j_{кз2}$ та $j_{кз1}$ – мінімальна та максимальна густина струму короткого замикання, p_1 та p_2 – мінімальна та максимальна потужність сонячного випромінювання.

$$\delta U_{pk} = \frac{U_{pk2} - U_{pk1}}{U_{pk1}} \cdot 100\%, \quad (3.4)$$

де U_{pk1} та U_{pk2} – мінімальна та максимальна напруга розімкнутого кола.

В ході роботи було досліджено фотоелектричні властивості сенсорів на основі SiNWs і було встановлено, що напруга розімкнутого кола U_{pk} та густина струму замкнутого кола J_{kz} (за потужності сонячного випромінювання 1000 Вт/м²) набували значень в діапазонах від 282 до 503 мВ та від 1,3 до 20,9 мА/см² відповідно, в залежності від різних технологічних параметрів операції МАСЕ. Згідно табл.3.4 збільшення часу осадження срібних наночастинок на першому етапі синтезу кремнієвих нанониток з 20 до 60 с призвело до покращення обох фотоелектричних параметрів, а саме: напруга розімкнутого кола збільшилася з 418 до 439 мВ, так і густини струму короткого замикання (з 4,6 до 7,8 мА/см²). При зміні часу травлення другого етапу МАСЕ з 45 до 135 хв значення U_{pk} зменшилося на 20% (з 395 до 331 мВ), а величина J_{kz} навпаки збільшилася майже в 2 рази (з 6,4 до 11,8 мА/см²). Протилежна ситуація спостерігається при збільшенні вмісту AgNO₃ в розчині на першому етапі МАСЕ з 34 до 68 мг: напруга розімкнутого кола збільшується незначною мірою (з 383 до 418 мВ), а густина струму короткого замикання зменшується (з 6,2 до 4,6 мА/см²). Було досліджено, що збільшення кількості H₂O₂ на другому етапі МАСЕ з 0,4 до 1,2 мл негативно впливає на обидва показники фотоелектричних характеристик сенсорів освітлення фотоелектричного типу. Таким чином, величина U_{pk} зменшується на 21% (з 448 до 356 мВ) і значення J_{kz} зменшується більше, ніж в 3 рази. З іншого боку, наявність текстури призводить до покращення фотоелектричних характеристик, а саме збільшує і напругу розімкнутого кола (з 323 до 393 мВ), і густину струму короткого замикання на 76% (з 1,3 до 5,4 мА/см²). Було виявлено, що за додаткової обробки в кислотному травнику досягається найбільше значення напруги розімкнутого кола (503 мВ), але зменшується густина струму короткого замикання (з 4,6 до 1,7 мА/см²). При обробці в лужному розчині зменшується і U_{pk} (з 418 до 301 мВ) і незначною мірою J_{kz} (з 4,6 до 4,3 мА/см²). З табл. 3.4 видно, що найкращого співвідношення значень фотоелектричних характеристик було досягнуто за таких технологічних параметрів

операції MACE: час осадження 20 с, час травлення 30 хв, вміст AgNO_3 становив 68 мг, вміст H_2O_2 становив 0,8 мл, текстурування поверхні відсутнє, додаткове травлення відсутнє.

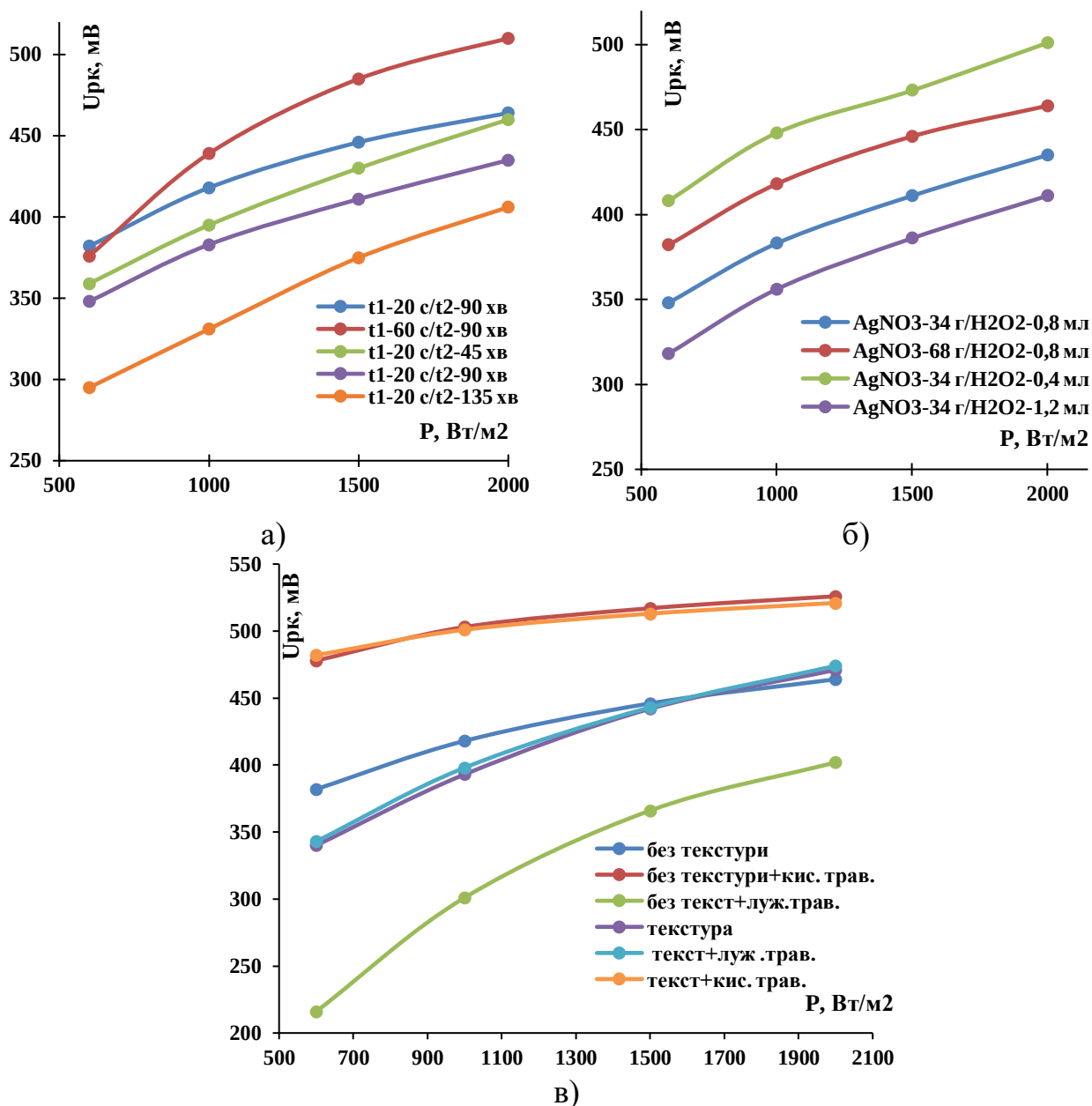


Рисунок 3.8 – Сімейства фоточутливих параметрів (U_{ph}) фотоелектричних сенсорів освітлення, синтезованих методом MACE з різними технологічними параметрами: t_1 (20/60 с), t_2 (45/90/135 хв) (а); AgNO_3 (34/68 мг), H_2O_2 (0,4/0,8 мл) (б); текстурування поверхні, обробка кислотним або лужним травниками (в)

Синтезовані структури фотоелектричного типу характеризуються майже лінійними кривими (рис. 3.9), що свідчить про придатність даних приладів у якості

ефективних сенсорів освітленості. З табл. 3.5 видно, що зміна технологічних параметрів операції MACE також впливає на коефіцієнт чутливості та відносну зміну напруги розімкнутого кола сенсорів освітлення на основі SiNWs. Було виявлено, що збільшення часу тривалості обох стадій операції MACE позитивно впливає на фоточутливі характеристики фотоелектричних сенсорів освітленості. Таким чином, збільшення часу осадження срібних наночастинок на першому етапі MACE викликає більше, ніж двократний приріст коефіцієнту фоточутливості (з 39 до 86 мА/Вт) та збільшує відносну зміну напруги розімкненого кола (з 21,5 до 35,6 %). Збільшення часу травлення на другому етапі MACE з 45 до 135 хв також призводить до значного росту K_ϕ на 57% (з 83 до 147 мА/Вт) та збільшення δU_{pk} (з 28,1 до 37,6 %). Було досліджено, що збільшення кількості $AgNO_3$ з 34 до 68 мг негативно впливає на фоточутливі показники сенсорів освітленості фотоелектричного типу на основі SiNWs, зменшуючи коефіцієнт фоточутливості більше, ніж в половину (з 80 до 39 мА/Вт) та відносну зміну напруги розімкненого кола з 25,0 до 21,5 %. Збільшення вмісту H_2O_2 з 0,4 до 1,2 мл позитивно впливає тільки на δU_{pk} (з 22,8 до 29,2 %), тоді як K_ϕ зменшується в три рази. Слід зазначити, що текстурування поверхні пластини до операції MACE покращує одразу обидва параметра фоточутливих характеристик сенсорів освітленості, що виражається у збільшенні коефіцієнта фоточутливості майже вдвічі (з 39 до 62 мА/Вт) та відносної зміни напруги розімкненого кола з 21,5 до 38,5 %. З табл. 3.4 видно, що обробка додатковими травниками поверхні пластини має різний вплив на фоточутливі характеристики. Тобто, додавання кислотного травника зменшує K_ϕ (з 39 до 19 мА/Вт) та δU_{pk} більше ніж в 2 рази (21,5 до 10 %), тоді як лужний травник навпаки утворює більш розвинену структуру, що покращує поглинання світла, і тим самим збільшує K_ϕ (з 39 до 43 мА/Вт) та δU_{pk} (з 21,5 до 86,1 %). Найбільшого коефіцієнту фоточутливості (203 мА/Вт) було досягнуто за таких технологічних параметрів операції MACE: час осадження 20 с, час травлення 30 хв, вміст $AgNO_3$ становив 68 мг, вміст H_2O_2 становив 0,8 мл, текстурування поверхні відсутнє, додаткове травлення відсутнє. Максимальне значення відносної зміни напруги

розімкненого кола становило 86,1%, що відповідає наступним технологічним параметрам операції MACE: час осадження 20 с, час травлення 90 хв, вміст AgNO_3 становив 68 мг, вміст H_2O_2 становив 0,8 мл, текстурована поверхня, додаткове травлення відсутнє.

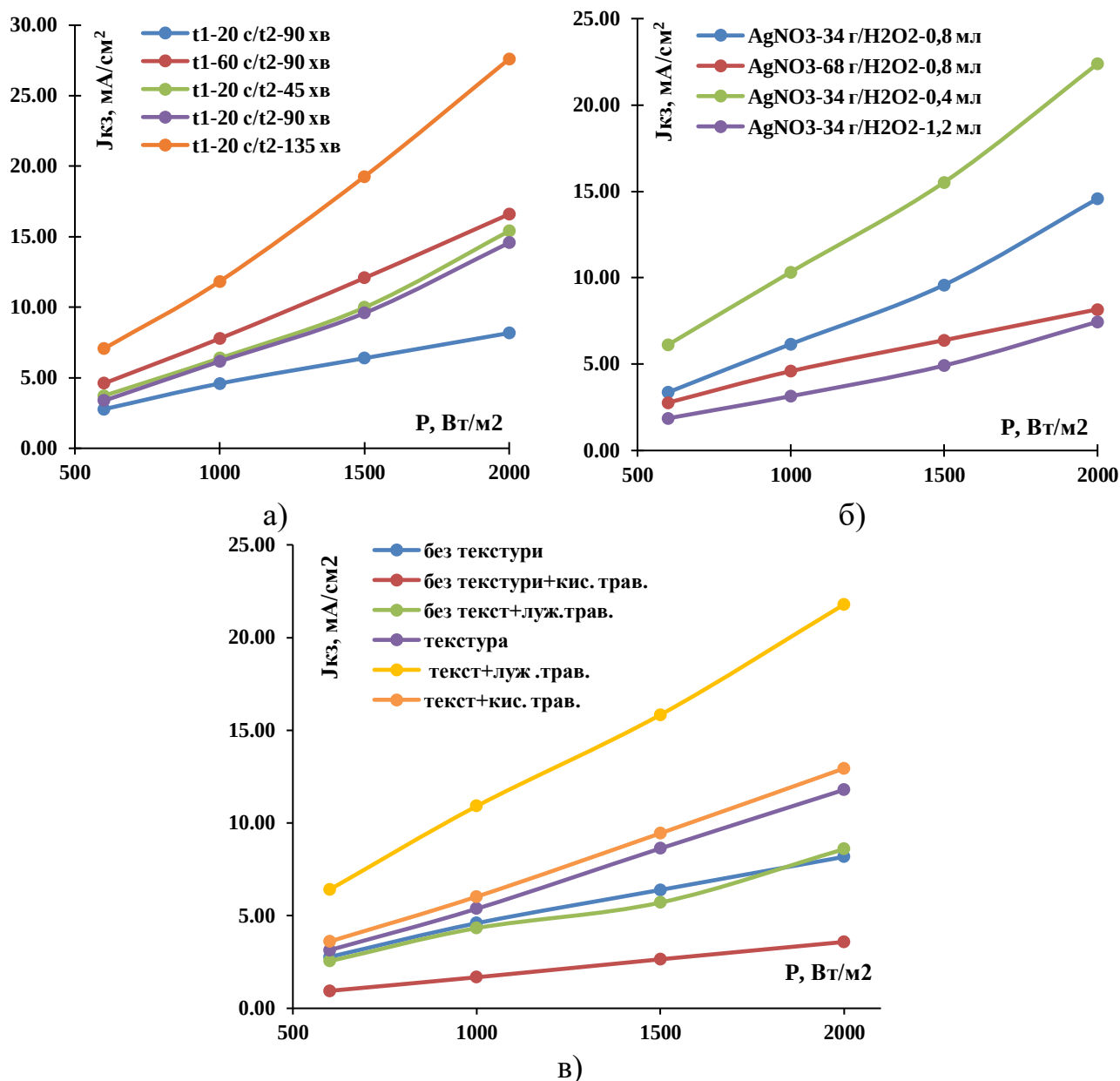


Рисунок 3.9 – Сімейства фоточутливих характеристик ($J_{кз}$) фотоелектричних сенсорів освітлення, синтезованих методом MACE з різними технологічними параметрами: t_1 (20/60 с), t_2 (45/90/135 хв) (а); AgNO_3 (34/68 мг), H_2O_2 (0,4/0,8 мл) (б); текстурування поверхні, обробка кислотним або лужним травниками (в)

3.4. Сенсори температури на основі SiNWs

3.4.1. Резистивні сенсори

Принцип дії резистивних сенсорів температури базується на зміні опору сенсора в залежності від температури. Електричні властивості сенсорів температури резистивного типу були розглянуті у підрозділі 3.3.1. Термочутливі параметри даних сенсорів були виміряні на основі темнових вольт-амперних характеристик (ВАХ) (рис.3.4) та розрахованих відповідних коефіцієнтів (табл.3.6).

Таблиця 3.6 – Електричні та термочутливі параметри резистивних сенсорів температури

№ зразку	1	2	3	4	5	6	7	8
R , Ом	62	28	38	47	32	66	92	54
Sp , ppm/K	321	221	48	1628	812	275	986	989
№ зразку	100	102	105	109	110	111	113	
R , Ом	200	67	106	85	79	54	43	
Sp , ppm/K	2336	1215	575	869	428	786	193	

Термочутливість резистивних сенсорів температури на основі SiNWs визначалася як відносна зміна опору при зміні температури від 20 до 80°C. З табл.3.5 видно, що зміна технологічних параметрів MACE значно впливає на величину термочутливості, оскільки діапазон виміряних значень термочутливості становить 48 – 2336 ppm/K. Зміна параметрів першої стадії MACE позитивно впливає на термочутливі характеристики резистивних сенсорів температури на основі SiNWs. Таким чином, зростання часу осадження з 20 до 60 с покращує термочутливість сенсорів температури з 221 до 986 ppm/K, а зміна вмісту AgNO_3 в розчині з 34 до 68 мг на порядок збільшує термочутливість (з 221 до 2336 ppm/K). Зміна параметрів другого етапу MACE навпаки негативно впливає на термочутливі параметри сенсорів: при збільшенні тривалості другої стадії MACE з 45 до 135 хв

відбувається зменшення термочутливості на 50% , як і зміна вмісту перекису водню з 0,4 до 1,2 мл, яка викликала зменшення термочутливості сенсорів температури з 321 до 48 ppm/K. На відміну від електричних характеристик, наявність текстурованої поверхні покращує термочутливість сенсорів резистивного типу, збільшуючи її на 37% (з 575 до 786 ppm/K). Обробка текстурованих зразків в додаткових травниках призводить до зростання термочутливості: у випадку з анізотропним (лужним) травником обробка забезпечила збільшення термочутливості з 193 до 428 ppm/K, а додаткова обробка ізотропним (кислотним) – з 193 до 786 ppm/K. Найбільшого значення термочутливості (2336 ppm/K) було досягнуто за таких параметрів MACE: час осадження 20 с, час травлення 90 хв, вміст AgNO_3 становив 68 мг, H_2O_2 становив 0,8 мл, текстурування поверхні та додаткове травлення відсутні.

3.4.2. Діодні сенсори

Принцип роботи термодіода полягає в зміні падіння напруги на р-n переході при зміні температури за сталого струму. Електричні властивості сенсорів температури діодного типу були розглянуті у підрозділі 3.3.2. Термочутливі властивості діодних сенсорів температури на основі SiNWs досліджувалися за допомогою темнових вольт-амперних характеристик та розрахованих коефіцієнтів випрямлення та термочутливості (табл. 3.7).

Величина термочутливості розраховувалася за формулою:

$$U(T) = U(T_0) - S \cdot (T - T_0), \quad (3,5)$$

де $U(T)$ і $U(T_0)$ – прикладені зміщення при максимальній T і мінімальній температурах T_0 відповідно, S – коефіцієнт термочутливості, який було виміряно при 100 мкА, оскільки пристрій самонагрівається при більшій силі струму, викликаючи помилки у виміряних значеннях температури.

Таблиця 3.7 – Електричні та термочутливі параметри діодних сенсорів температури

№ зразку	1	2	3	4	5	6	7	8	100
K_v	123	165	91	49	6	77	152	44	55
S , мВ/К	2,3	0,9	1,3	2	1,3	1,3	1,8	1,3	1,7
№ зразку	101	102	104	105	109	110	111	112	113
K_v	14	57	1924	2	2503	32	1745	54	90
S , мВ/К	0,8	1,5	2,3	0,2	2	1,0	2,5	1,7	1,5

В табл. 3.7 та на рис.3. 10 продемонстровано як по різному впливають часи обох етапів МАСЕ на термочутливість діодного сенсора. При збільшенні тривалості осадження срібних наночастинок з 20 до 60 с коефіцієнт термочутливості виріс в 2 рази (з 0,9 до 1,8 мВ/К), а при збільшенні часу травлення з 90 до 135 хв термочутливість сенсора зменшилася з 2 до 1,3 мВ/К. Збільшення вмісту AgNO_3 в розчині на першій стадії МАСЕ з 34 до 68 мг призводить до росту чутливості з 0,9 до 1,7 мВ/К. При збільшенні кількості H_2O_2 з 0,4 на другому етапі МАСЕ чутливість сенсора зменшилася з 2,3 до 0,9 мВ/К. Попереднє текстурування поверхні зразку зменшує термочутливість більше ніж вдвічі. Використання обробки в кислотного травнику покращило термочутливі характеристики зразків (з 1,7 до 2,3 мВ/К), а у випадку лужного травника погіршило до 0,2 мВ/К. Найкращими термочутливими властивостями (2,5 мВ/К) характеризується зразок, який було синтезовано за наступних параметрів МАСЕ: час осадження 20 с, час травлення 90 хв, вміст AgNO_3 становив 68 мг, вміст H_2O_2 становив 0,8 мл, поверхня текстурована, додаткова обробка кислотним травником.

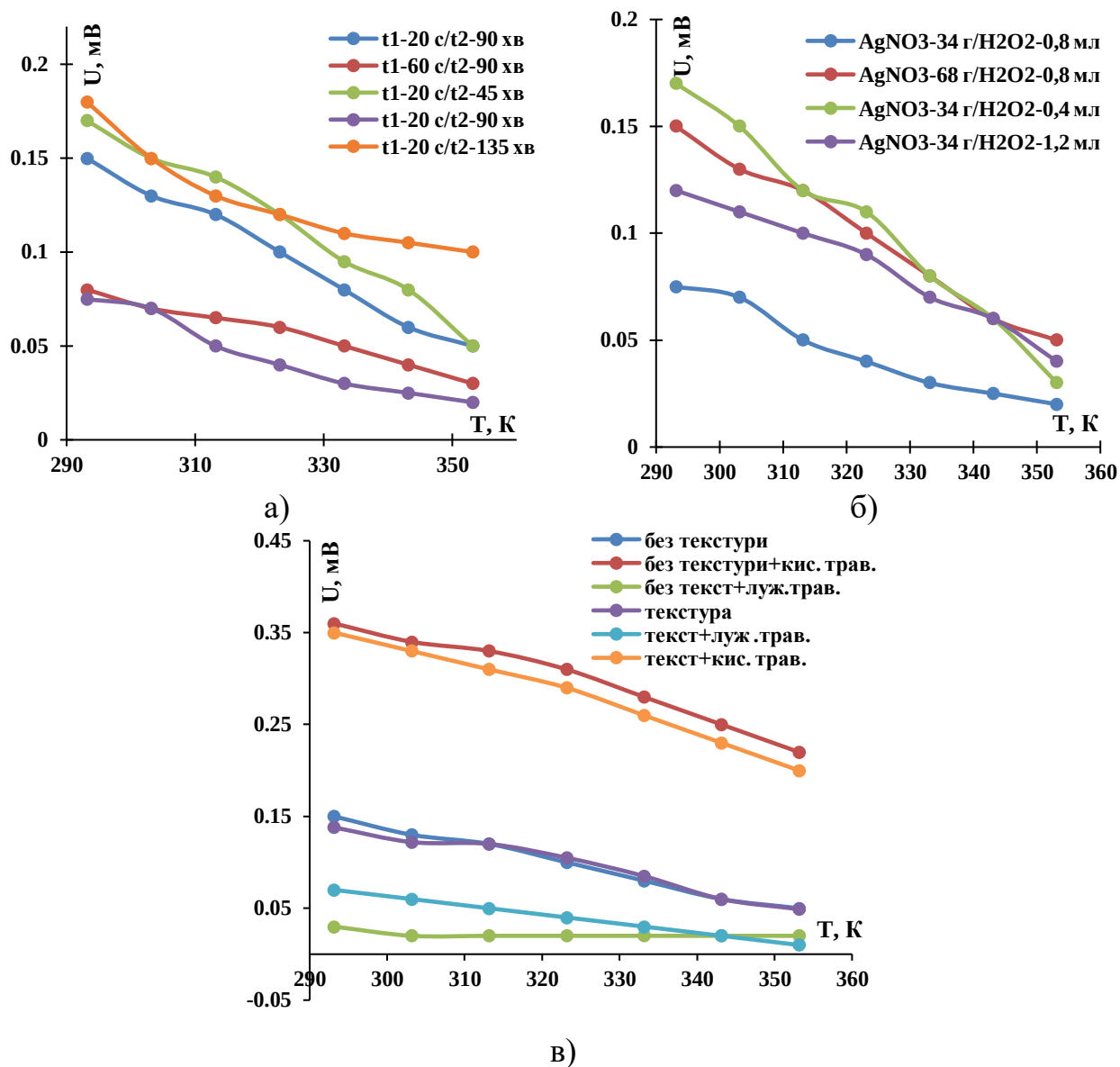


Рисунок 3.10 – Сімейства термочутливих характеристик діодних сенсорів, синтезованих методом MACE з різними технологічними параметрами: t_1 (20/60 с), t_2 (45/90/135 хв) (а); AgNO_3 (34/68 мг), H_2O_2 (0,4/0,8 мл) (б); текстурування поверхні, обробка кислотним або лужним травниками (в)

3.5. Сенсори вологості на основі SiNWs

3.5.1. Діодні сенсори

Принцип роботи діодного сенсора вологи базується на зміні значення зворотного струму залежно від рівня відносної вологості. Електричні властивості

сенсорів вологи діодного типу були розглянуті у підрозділі 3.3.2. Вологочутливі властивості діодних сенсорів температури на основі SiNWs досліджувалися за допомогою сольового гігростату з різними рівнями вологості на основі коефіцієнта вологочутливості (табл. 3.8), що визначався з графіків залежності зворотного струму від значення відносної вологості як показник експоненти апроксимуючої кривої (рис. 3. 11). Величина відносної вологості була фіксованою та варіювалися залежно від основи насиченого розчину солі з дистильованою водою: 12% (LiCl), 33% (MgCl₂), 60% (NaBr), 75% (NaCl), 85% (KCl), 98% (H₂O). Вимірювання проводилися при зворотній напрузі в 4 В, адже при такому значенні досягалася максимальна чутливість сенсора вологості.

Таблиця 3.8 – Коефіцієнт вологочутливості діодних сенсорів вологості

№ зразку	1	2	3	4	5	6	7	8	100
S, (%RH) ⁻¹	1,1	2	1	1	0,5	1,4	0,8	1	1,5
№ зразку	101	102	104	105	109	110	111	112	113
S, (%RH) ⁻¹	2,1	0,8	3	0,2	4,9	1,8	3,2	0,8	1,6

З табл.3.8 видно, що зміна технологічних параметрів MACE значно впливає на величину вологочутливості, що підтверджує діапазон вимірюваних даних: 0,2 – 4,9 (%RH)⁻¹. В ході вимірювань було визначено, що збільшення часу осадження срібла на першому етапі MACE (з 20 до 60 с) покращує вологочутливість на 29% (з 1,5 до 2,1 (%RH)⁻¹). З іншого боку, збільшення вмісту нітрату срібла на другому етапі MACE негативно вплинуло на вологочутливий параметр, і призвело до його зменшення (з 2 до 1,5 (%RH)⁻¹). Такий ефект можна пояснити наступним чином: більша кількість AgNO₃ підвищує вірогідність утворення срібних дендритів на поверхні приладу.

Зміна ж параметрів другого етапу MACE призвела до неоднозначних результатів. У випадку зміни часу травлення з 45 до 135 хв, найбільший показник вологочутливості спостерігався за часу 90 хв (2 (%RH)⁻¹). Такий же результат було отримано при зміні вмісту перекису водню з 0,4 до 1,2 мл: ідентичне значення

вологочутливості ($2\text{ }(\%RH)^{-1}$) було досягнуто при 0,8 мл H_2O_2 . Попереднє текстурування поверхні кремнієвої пластини вплинуло на вологочутливість в незначній мірі (з 1,5 до 1,6 $(\%RH)^{-1}$).

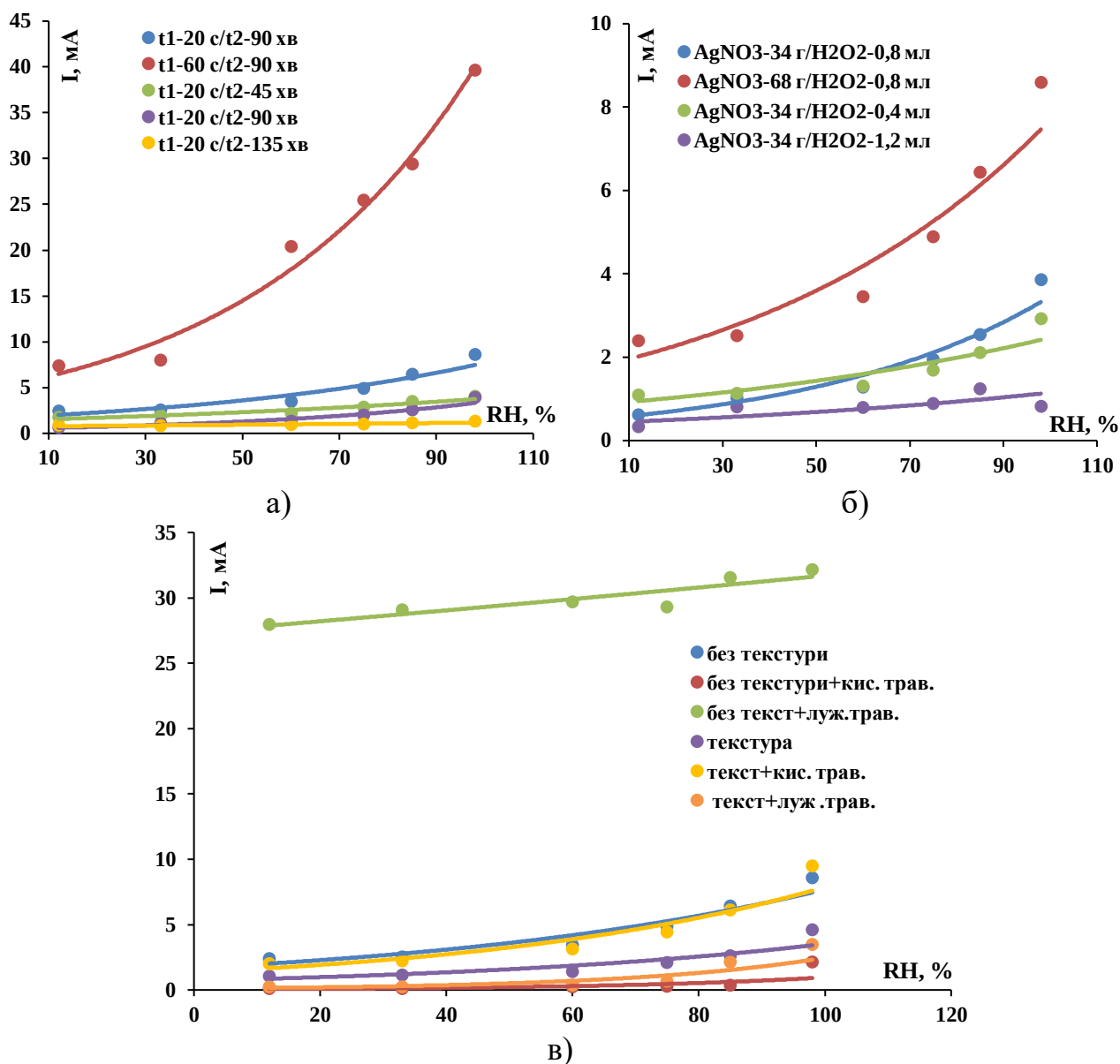


Рисунок 3.11 – Сімейства вологочутливих характеристик діодних сенсорів, синтезованих методом MACE з різними технологічними параметрами: t_1 (20/60 с), t_2 (45/90/135 хв) (а); $AgNO_3$ (34/68 мг), H_2O_2 (0,4/0,8 мл) (б); текстурування поверхні, обробка кислотним або лужним травниками (в)

Також було досліджено вплив додаткової обробки в травниках з різним механізмом травлення. Таким чином, травлення кислотним травником призвело до збільшення вологочутливості в 2 рази. А у випадку обробки лужним травником

чутливість набагато зменшилася (з 1,5 до 0,2 (%RH)⁻¹). Однак, комбінація текстурування з додатковою обробкою травником покращує вологочутливість як для анізотропного травника (з 1,6 до 1,8 (%RH)⁻¹), так і для ізотропного (з 1,6 до 3,2 (%RH)⁻¹). Максимальне значення вологочутливості (4,9 (%RH)⁻¹) було отримано за таких технологічних параметрів операції MACE: час осадження 60 с, час травлення 30 хв, вміст AgNO₃ становив 68 мг, вміст H₂O₂ становив 0,8 мл, попереднє текстурування поверхні, додаткове травлення відсутнє.

ВИСНОВКИ

Під час виконання дипломної роботи було здійснено літературний огляд технологічних методів синтезу кремнієвих нанониток та приладів на їх основі. Було встановлено переваги та недоліки різних методів синтезу кремнієвих нанониток, а також набір ключових технологічних параметрів в межах кожного методу. Також проведено огляд розроблених на сьогодні сенсорів на основі кремнієвих нанониток.

В експериментальній частині було розроблено технологію синтезу діодних та резистивних сенсорів освітленості, температури та вологості на основі SiNWs, а також визначено оптимальні технологічні режими їх синтезу для отримання покращених фоточутливих, термочутливих та вологочутливих характеристик отриманих сенсорів.

Максимальні коефіцієнти чутливості, отримані в даній роботі для сенсорів на основі SiNWs були наступними: для фоторезистора (0,91 мА/лВ), для фотодіода (3,1 мА/лВ), для фотоелектричного сенсора освітленості (203 мА/Вт), для терморезистора (2336 ppm/K), для термодіода (2,5 мВ/К), для діодного сенсора вологості (4,9 (%RH)⁻¹).

Оптимальними технологічними умовами МАСЕ для синтезу кремнієвих нанониток для застосування їх в сенсорах навколишнього середовища є такі умови: час осадження наночастинок срібла 20 – 60 с, час травлення кремнію 30 – 90 хв, вміст AgNO₃ 68 мг, H₂O₂ 0,8 мг, текстурування та обробка в кислотному травнику (опційно).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Gautam, V. Silicon nanowires/reduced graphene oxide nanocomposite based novel sensor platform for detection of cyclohexane and formaldehyde / V. Gautam, A. Kumar, R. Kumar, V. J. Kumar, Nagpal // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2021. – Vol. 123. – P. 105571.
2. Rani, S. Hybrid and Combined Processes for Air Pollution Control: Methodologies, Mechanisms and Effect of Key Parameters / S. Rani, S. C. Roy. – Amsterdam: Elsevier Inc., 2022. – 376 p.
3. Coffey, J. Semiconducting Silicon Nanowires for Biomedical Applications / J. Coffey. – Boston: Woodhead Publishing, 2022. – 296 p.
4. Kumar, V. Nanosilicon / V. Kumar. – Amsterdam: Elsevier Ltd., 2007. – 368p.
5. Fasoli, A. Overview and status of bottom-up silicon nanowire electronics / A. Fasoli, W.I. Milne // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2012. – Vol. 15. – P. 601 – 614.
6. Yu, P. Design and fabrication of silicon nanowires towards efficient solar cells / P. Yu, J. Wu, S. Liu, J. Xiong, C. Jagadish, Z. M. Wang // *Nano Today*. – 2016. – Vol. 11. – P. 704 – 737.
7. Solanki, A. Top-Down Etching of Si Nanowires / A. Solanki, H. Um // *Semiconductors and Semimetals*. – 2018. – Vol. 98. – P. 71 – 149.
8. Chena, X. Nanowire-based gas sensors / X. Chena, C. K. Y. Wong, C. A. Yuan, G. Zhang // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2013. – Vol. 177. – P. 178 – 175.
9. Han, H. Metal-assisted chemical etching of silicon and nanotechnology applications / H. Han, Z. Huang, W. Lee // *Nano Today*. – 2014. – Vol. 9. – P. 271 – 304.
10. Alhmoud, H. MACEing silicon: Towards single-step etching of defined porous nanostructures for biomedicine / H. Alhmoud, D. Brodoceanu, R. Elnathan, T. Kraus, N. H. Voelcker // *Progress in Materials Science*. – 2021. – Vol. 120. – P.100817.

11. Kuech, T. F. Handbook of crystal growth / T. F. Kuech. – Elsevier B.V., 2014. – 1346 p.
12. Micro-fabrication in IMSE Cleanroom. – Режим доступу до електронного ресурсу: https://epsc.wustl.edu/imse/website/ti_rie.html.
13. Plasma etching and cleaning strategy for better product quality. – Режим доступу до електронного ресурсу: <https://www.thierry-corp.com/plasma-etching-and-cleaning-strategy-for-better-product-quality>.
14. Ni, L. VLS silicon nanowires based resistors for chemical sensor applications / L. Ni, E. Jacques, R. Rogela, A. C. Salaün, L. Pichon, G. Wenga // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 47. – P. 240 – 243.
15. Akbari-Saatlu, M. Silicon Nanowires for Gas Sensing: A Review / M. Akbari-Saatlu, M. Procek, C. Mattsson, G. Thungström, H. Nilsson, W. Xiong, B. Xu, Y. Li, H. H. Radamson // Nanomaterials. – 2020. – Vol. 10.– P. 2215.
16. Chang, Y. VOC detection using multimode e-nose composed of bulk acoustic wave resonator and silicon nanowire field effect transistor array / Y. Chang, H. Qu, X. Duan, L. Mu, M. A. Reed // IEEE Sensors. – 2016. – P. 1 – 3.
17. Zhao, X. A silicon nanowire heater and thermometer / X. Zhao, Y. Dan // Applied physics letters. – 2017. – Vol. 111. – P. 043504.
18. Ліневич Я.О. Сенсори температури на основі кремнієвих нанониток, одержаних методом метало-стимульованого хімічного травлення / Я.О. Ліневич, В.М. Коваль, М.Г. Душейко, М.О. Лакида // Перспективні технології та прилади. – №21. – 2022 – С.137-145.
19. Linevych, Y. Silicon Diode Structures Based on Nanowires for Temperature Sensing Application / Y. Linevych, V. Koval, M. Dusheiko, Y. Yakymenko, M. Lakyda V. Barbash // 42th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Conference Proceedings. – Kyiv (Ukraine), 2022. – P.190-195.
20. Ліневич Я.О. Синтез та дослідження кремнієвих 1D нанорозмірних структур для застосування в сенсорах освітленості / Я.О. Ліневич, В.М. Коваль, М.Г. Душейко, М.О. Лакида // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2022. – 4 том. – С. 327 – 337.

21. Ліневич, Я. О. Сенсори на основі нанорозмірних кремнієвих 1D структур для промислового, екологічного та медичного моніторингу / Я. О. Ліневич, В. М. Коваль // Мікросист., Електрон. та Акуст. – 2022. – Т. 27, вип. 2. – С. 264376–1
22. Sahoo, M. K. Integration of silicon nanowires in solar cell structure for efficiency enhancement: A review / M. K. Sahoo, P. Kale // Journal of Materiomics. – 2019. – Vol. 5. – P. 34-48.
23. Taghinejad, H.. Fabrication and modeling of high sensitivity humidity sensors based on doped silicon nanowires / H. Taghinejad, M. Taghinejad, M. Abdolahad, A. Saeidi, S. Mohajerzadeh // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2013. – Vol. 176. – P. 413 – 419.