

### ВПЛИВ ВОЛОГОСТІ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОРЕЗИСТОРІВ З НАПІВПРОВІДНИКОВИХ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ

© Байцар Р. І., Бортнік Г. М., Варшава С. С., Столярчук П. Г., 2000  
Державний університет "Львівська політехніка"

*Досліджено вплив вологості на характеристики терморезисторів з напівпровідникових ниткоподібних кристалів (НК) GaAsP, які знаходяться в режимі перегріву відносно навколишнього середовища. Терморезистори виготовляли з НК GaAsP р-типу, легованих Си, різної морфології та геометрії. Досліджено також характер залежностей  $U = f(\varphi)$  і  $\Delta U = f(\varphi)$  ( $\Delta U = U_{пр} - U_{зв}$ ) та основні теплофізичні параметри терморезисторів в режимі перегріву. Зроблено висновки про можливість їх використання для вимірювання вологості.*

Існують різні типи давачів вологості: психрометричного типу з напівпровідниковими терморезисторами (термопарами), гігрометри, давачі точки роси, електролітичні підігрівні давачі, емнісні, електричні сорбційні та інші [1]. Новим і перспективним напрямком в даній галузі, на нашу думку, є використання напівпровідникових ниткоподібних кристалів (НК) як вимірювачів вологості, дія яких базується на ефекті Зеебека [2]. Теорія теплообміну між нагрітим терморезистором і середовищем більш розроблена для термоанемометрів, для яких досліджено залежність коефіцієнта теплообміну (коефіцієнта розсіювання) від швидкості потоку повітря [3]. Для випадку зміни вологості навколишнього середовища ця залежність досліджена недостатньо.

Важливою є задача дослідження впливу вологості на характеристики терморезисторів (ТР) з напівпровідникових ниткоподібних кристалів GaAsP, які знаходяться в режимі перегріву відносно навколишнього середовища. Терморезистори виготовляли з НК GaAsP р-типу, легованих Си [4], різної морфології та геометрії: стрічки, досконалі голки, неоднорідні голчасті кристали, довжиною  $L=2...7,5$  мм, шириною грані  $a=50...200$  мкм. Номінали опорів НК при кімнатній температурі становили 0,14...7,5 МОм, температурний коефіцієнт опору ТКО=1...2,2 %/К, параметр  $B=2000...3000$ К. Основні параметри

терморезисторів наведені в табл. 1.

В ряді випадків вольт-амперні характеристики (ВАХ) терморезисторів були нелінійними і значення прямих і зворотніх опорів були різними. Таким чином, задаючи різні значення струму перегріву, вимірювали спад напруги на ТР в двох напрямках при різних значеннях вологості повітря.

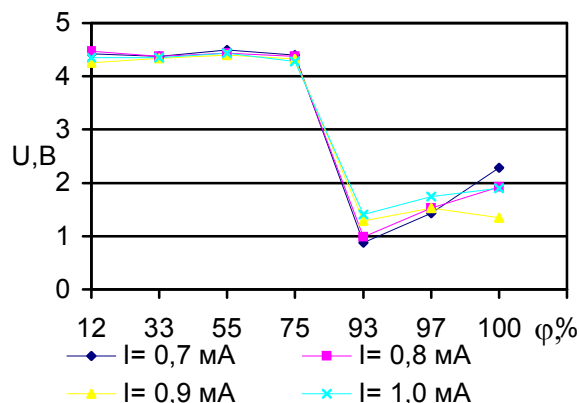


Рис. 1. Залежність різниці напруги  $\Delta U = U_{пр} - U_{зв}$  від відносної вологості  $\varphi$  для терморезистора ТР-2 при різних значеннях струму.

Таблиця 1 - Основні параметри терморезисторів.

Тип ТР	R, МОм	$\rho$ , Ом-см	ТКО, %/К	L, мкм	a, мкм	S, мкм <sup>2</sup>	Тип кристала
ТР-1	0,145	15,7	2,19	4000	100	4330	ниткоподібний кристал
ТР-2	0,78	180	2,78	7500	200	17320	неоднорідн. голчастий кристал
ТР-3	7,5	692	1,13	6500	200 30	6000	стрічковий НК
ТР-4	0,5	16,9	1,23	5000	62,5	1691,4	досконала голка

ТР-5	1,2	64,9	0,9	2000	50	1082,5	короткий тонкий НК
------	-----	------	-----	------	----	--------	--------------------

Здійснено аналіз основних результатів досліджень. Для ТР-1 досліджували вплив вологості на його ВАХ, задаючи струм в діапазоні 0,7...1 мА при двох полярностях. Одержані ВАХ мають прямолінійний характер з певним кутом нахилу при відповідній вологості, який зменшується при збільшенні вологості ( $\varphi = 12...100\%$ ). Встановлено, що чутливість ТР до вологості залежить від струму живлення. Таким чином, за рахунок струму живлення можна змінювати чутливість ТР до вологості. При зміні полярності струму нахил характеристик практично не змінюється. Встановлено, що терморезистори ТР-1, ТР-2 слабо реагують на зміну вологості в діапазоні  $\varphi=12...90\%$ . Для ТР-2 досліджували вплив стабілізованого струму  $I$  (0,7...1 мА) на залежність  $U=f(\varphi)$  для прямих і зворотніх напрямків струму. Суттєва різниця в характері залежностей не спостерігалася, хоча різниця між значеннями  $U_{пр}$  і  $U_{зв}$  складала  $\approx 4,5$  В. Залежності  $U=f(\varphi)$  при  $\varphi=12...90\%$  мають характер, близький до прямої лінії, а в діапазоні 90...100% спостерігається різкий спад напруги ( $\approx 1...4$  В) з мінімумом при 93% і з подальшим зростанням до 100% (рис. 1). Початкові значення спаду напруги на ТР-2 при різних значеннях  $I$  і мінімальній відносній вологості складали 18...26 В.

Використовуючи різницю напруги на терморезисторі  $\Delta U = U_{зв} - U_{пр}$  при двох напрямках струму як параметр, аналізували його зміну в залежності від відносної вологості. Для ТР-2 залежність  $\Delta U=f(\varphi)$  утворює смугу шириною 300...400 мВ, яка слабо залежить від  $\varphi$  в межах 12...90% і, аналогічно до залежності  $U=f(\varphi)$ , спостерігається скачок  $\Delta U \approx 3,5$  В при  $\varphi \approx 91...93\%$  з подальшим зростанням в межах 1 В при  $\varphi=100\%$ .

Для ТР-3 в залежностях  $U=f(\varphi)$  має місце невелике зростання спаду напруги як для прямого, так і для зворотнього напрямку струму з максимумом при 70% і подальшим спадом при  $\varphi \approx 75...95\%$ . Невелике зростання  $U=f(\varphi)$  проявлялося і для ТР-2 при  $\varphi \approx 50\%$ . У випадку ТР-3 зміна напруги  $\Delta U$  в діапазоні вологості  $\varphi=12...55\%$  зменшується, а в діапазоні 70...100% спостерігаємо різке її зростання в межах  $\approx 2$  В (рис. 2).

Встановлено, що для терморезисторів ТР-4 і ТР-5 залежності спаду напруги при стабілізованому струмі живлення 0,2...1 мА від вологості мають горбоподібний характер з першим максимумом при 30% і другим – при 95%. На рис. 3 наведені залежності  $\Delta U=f(\varphi)$  для ТР-4. На відміну від ТР-2 залежність зміни напруги від відносної вологості має невеликий спад до 97%, або має ділянки зростання і спаду в залежності від  $I$ . Зауважимо, що при менших

струмах залежність  $\Delta U=f(\varphi)$  є більш вираженою.

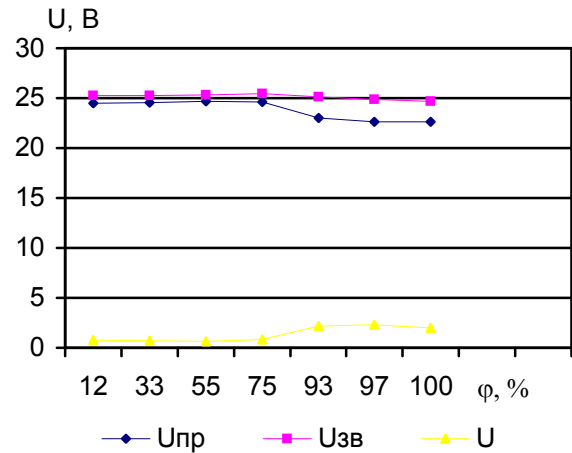


Рис. 2. Залежність напруги та різниці напруги  $\Delta U$  від відносної вологості  $\varphi$  для терморезистора ТР-3.

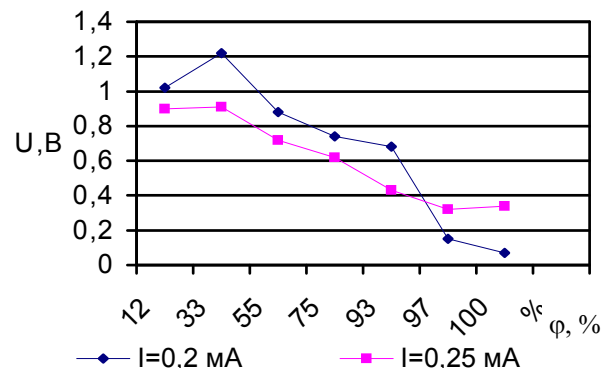


Рис. 3. Залежність різниці напруги  $\Delta U$  від відносної вологості  $\varphi$  для ТР-4 при різних значеннях струму.

Таким чином, дослідження показали, що ТР-1 і ТР-2 можна використовувати для роботи в режимах автоматичного регулювання вологості при  $\varphi \approx 90...100\%$ . Для ТР-3 можна використовувати ділянку  $\Delta U=f(\varphi)$  для вимірювання вологості в діапазоні 60...100%. ТР-4 можна теж використовувати при вимірюванні вологості в діапазоні 35...97%.

Зупинимося на теплофізичних параметрах досліджуваних терморезисторів. В табл. 2 подані основні параметри, а саме:  $T_n$  – температура перегріву чутливого елемента (ЧЕ) для різних значень відносної вологості,  $\alpha$  – коефіцієнт теплопередачі,  $H$  – коефіцієнт розсіювання та  $P$  – розсіювана потужність при заданих струмах перегріву  $I$  ЧЕ. Найвищу  $T_n$  має ТР-2 (до 482 К). Характерною є різниця параметрів для двох напрямків струму. Значення  $\alpha \approx 66,2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) для прямого напрямку струму,  $H \approx 0,29$  мВт/К, розсіювана потужність  $P \approx 26,2$  мВт. Для ТР-3 значення  $\alpha$  були дещо вищими, ніж для

Таблиця 2 - Основні теплофізичні параметри терморезисторів.

Тип ТР	Струм перегріву, мА	Температура перегріву, К			Коефіцієнт теплопередачі, Вт/м <sup>2</sup> ·К			Коефіцієнт розсіювання, мВт/К			Розсіювана потужність, мВт		
		Тп <sub>1</sub>	Тп <sub>2</sub>	Тп <sub>3</sub>	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>	α <sub>3</sub>	Н <sub>1</sub>	Н <sub>2</sub>	Н <sub>3</sub>	Р <sub>1</sub>	Р <sub>2</sub>	Р <sub>3</sub>
	φ, %	12	--	93	12	--	93	12	--	93	12	--	93
ТР-2	1,0	381	--	383	66,2	--	57,3	0,29	--	0,26	26,2	--	23,2
	1,0	476	--	482	28,2	--	25,6	0,13	--	0,12	23,2	--	21,8
	φ, %	12	75	99	12	75	99	12	75	99	12	75	99
ТР-3	1,0	400	392	403	88	95,6	79,2	0,23	0,25	0,21	24,5	24,6	22,7
	φ, %	12	33	--	12	33	--	12	33	--	12	33	--
ТР-4	0,20	362	363	--	123	121,8	--	0,12	0,11	--	8,0	7,99	--
	0,25	377	363	--	145,8	177,8	--	0,14	0,17	--	11,5	11,7	--

ТР-2. Для ТР-4 задавали значення струму перегріву  $I$  значно меншим (0,2...0,25 мА),  $T_n$  дещо менша, ніж для попередніх терморезисторів (362...377 К), а значення  $\alpha$  були більшими, ніж в ТР-2, в декілька разів. Значення  $H \approx 0,12...0,17$  мВт/К і розсіювана потужність становила 8...11,7 мВт.

Тепловий баланс терморезистора, як і для розігрітих металевих дротин, описується рівнянням Кінга для випадку, що  $\frac{d \cdot c \cdot \rho \cdot v}{\lambda} > 0,08$  [3] (значення

наведеного параметра складало  $\approx 0,3$ ), де  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c$  – теплопровідність, густина і питома теплоємність газу;  $v$  – швидкість повітря;  $d$  – діаметр НК. Під дією вологості змінюються параметри середовища і в першу чергу його в'язкість (проявляється це через число Рейнольдса  $Re$ ), тобто ті параметри, які визначають конвективну теплопередачу і входять в  $\alpha$ , а також  $T_n$  чутливого елемента за рахунок теплопровідності газового середовища і теплопровідності контактних дротин. Все це дозволяє говорити тільки про ефективний коефіцієнт теплопередачі  $\alpha_{ef}$  і про складний характер залежності  $U=f(\varphi)$ . Як і для нагрітих твердих тіл, середні значення  $\alpha \approx 100$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) [5], як і для термоанемометрів  $\alpha$  обернено пропорційно залежить від  $T_n$  [6]. В результаті порівняння одержаних нами теплофізичних параметрів з параметрами серійних терморезисторів типу СТ1-19 [3] було встановлено, що для СТ1-19 параметр  $H \approx 0,35...0,5$  мВт/К, розсіювана потужність  $P \approx 300$  мВт, а для давачів тиску ТР коефіцієнт розсіювання  $H \approx 0,12...0,24$  мВт/К, що в два рази є меншим, а розсіювана потужність  $P \approx 8...25,7$  мВт і є меншою за рахунок мікронних розмірів терморезисторів типу ТР. Відмітимо, що для СТ1-19 значення постійної  $B$  є вищими, ніж у давачів ТР, і більшою є площа бічної поверхні. Важливою перевагою терморезисторів ТР є тепла інерційність  $\tau$ . Так, для відомих давачів типу СТ1-19 постійна  $\tau \approx 1$

с, в той час як у випадку з ТР, максимальна тепла інерційність  $\tau_m$ , оцінена з формули  $\tau_m = \frac{mc}{\lambda}$ , скла-

дає 3 мс, що значно нижче, ніж в зазначених серійних терморезисторів. Якщо порівняти параметри терморезисторів ТР з параметрами терморезисторів типу ТШ-1 (короткий стрижень в потоці повітря), то для випадку  $Re < 10$  (в нашому випадку  $Re \approx 0,5$ ) приводиться залежність  $Nu = 1,4Re^{0,25}$ , де  $Nu$  – критерій Нуссельта, який визначають з рівняння  $Nu = \alpha \cdot L / \lambda$  [3]. При використанні даного рівняння для опису характеристик ТР одержуємо добре узгодження критеріальних параметрів для терморезисторів ТР-3 і ТР-4 у випадку  $\alpha \approx 100$  мВт/(м<sup>2</sup>·К). Із зміною вологості змінюється теплопередача через контакти і в навколишнє середовище (слід відмітити, що теплопровідність водяної пари в 1,5 рази є меншою, ніж теплопровідність повітря), що суттєво впливає на характер залежностей  $U=f(\varphi)$  при вологості близькій до 100%. Однак ця ділянка вимагає подальших досліджень.

1. Берлинер М. А. Измерения влажности. – М.: Энергия, - 1973. – 400 с. 2. Варшава С. С., Возный З. И., Григорова В. Р. Термоэлектрический датчик влажности. – АС СССР № 1784901 от 15.06.1990. 3. Ференец В. А. Полупроводниковые струйные термоанемометры. – М.: Энергия. – 1972. - 112 с. 4. Островская А. С., Варшава С. С., Резистивные датчики на основе микрокристаллов арсенида-фосфида галлия // Приборы и системы управления. - № 7. - 1989. – С. 30–31. 5. Варшава С. С., Островская А. С., Чекурин В. Ф., Щербай К. С. Термоанемометр. АС СССР № 1569858, - БИ № 21, -1990. 6. Крейт Ф., Блек У. Основы теплопередачи. Пер. с англ. Под ред. А. А. Амфилова – М.: Мир. - 1983. - С. 23.