

ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОСНОВІ НАНОКОМПОЗИТНОГО НАПІВПРОВІДНИКОВОГО МАТЕРІАЛУ

¹Вінницький національний технічний університет

Досліджено гетерометалічну комплексну сполуку — тетракіс- μ 3-(метоксо)(метанол)-пентакіс(ацетилацетонато)(трикупрум(II), неодим(III)) метанол (I) складу $[\text{Cu}_3\text{Nd}(\text{AA})_5(\text{OCH}_3)_4\text{CH}_3\text{OH}]\cdot\text{CH}_3\text{OH}$, де $\text{HAA} = \text{H}_3\text{C}-\text{C}(\text{O})-\text{CH}_2-\text{C}(\text{O})-\text{CH}_3$. Для синтезованої сполуки проведено елементний аналіз, а також магнетохімічні, ІЧ-спектроскопічні та термогравіметричні дослідження. На основі отриманих результатів встановлено, що склад сполуки (I) відповідає цій формулі. Для зазначеного комплексу визначено молярну масу (985,5 г/моль), кількість валентних електронів у молекулі (270), масу однієї молекули, а також визначено загальну кількість молекул у циліндричному зразку масою 0,125 г і об'ємом $17,74 \cdot 10^{-9}$ м³. Додатково розраховано загальне число валентних електронів у зразку.

Встановлено, що в температурному інтервалі 303...423 К питомий опір пресованого порошку зменшується від $2 \cdot 10^{12}$ до $5 \cdot 10^4$ Ом·см, що свідчить про напівпровідниковий характер отриманої речовини. Ширина забороненої зони становить 1,61 еВ. Проведеними розрахунками підтверджено, що отримана речовина дійсно проявляє напівпровідникові властивості, причому перенос заряду в ній здійснюється як електронами, так і дірками, тобто має місце двополярна провідність.

З метою практичного використання сполуки як термочутливого елемента, досліджуваний матеріал додатково спресовано у форму SMD-терморезистора типу 0402 з геометричними параметрами $(1 \times 0,5 \times 0,5) \cdot 10^{-3}$ м.

Розроблено математичну модель частотного перетворювача температури на основі нанокompозитного матеріалу тетракіс- μ 3-(метоксо)(метанол)-пентакіс(ацетилацетонато)(трикупрум(II), неодим(III)) метанол (I) та активним індуктивним елементом, яка складається з трьох біполярних та МДН-транзисторів. Для визначення функції перетворення, розв'язано систему рівнянь Кірхгофа та встановлено залежність частоти генерації від температури, отримано аналітичну залежність функції перетворення.

Ключові слова: температурний перетворювач, біполярний транзистор, польовий транзистор, нанокompозитний матеріал.

Вступ

Більшість промислових терморезисторів з негативним температурним коефіцієнтом опору (ТКО) виготовляють із напівпровідникових матеріалів на основі оксидів 3d-металів [1]—[3]. У промислових умовах такі матеріали зазвичай отримують методом співсадження або мокрого змішування вихідних речовин, подальшого подрібнення в кульових млинах і високотемпературного спікання компонентів [4], [5].

Проте оксидні напівпровідники мають низку недоліків: зміна складу під дією електричного струму, хімічна нестабільність у робочому температурному діапазоні, чутливість до домішок і труднощі у відтворенні параметрів, зокрема номінального опору та ТКО. До того ж такі матеріали не дають змоги отримати широкий діапазон питомих опорів, що обмежує можливість створення виробів однакової розмірів з різними значеннями опору.

У зв'язку з цим, актуальним завданням є синтез нових напівпровідникових сполук з високими показниками провідності та ТКО, що дозволить створювати чутливі терморезистори нового покоління. Особливої уваги серед перспективних матеріалів заслуговують координаційні комплекси, у яких β -дикетон виконує функцію хелатуючого або місткового ліганду [6].

Використання напівпровідникових структур з від'ємним диференціальним опором у класичних схемах підсилювальних, перемикаючих, генераторних і логічних пристроїв є добре вивченим

напрямом сучасної електроніки. Проте застосування терморезистивних елементів, створених на основі нанокompatитних напівпровідникових терморезисторів, у мікроелектронних перетворювальних структурах перебуває лише на початковому етапі розвитку.

Наявність додаткового каналу зв'язку у таких системах істотно розширює їхні функціональні можливості, а використання мікроелектронних технологій дозволяє підвищити чутливість, розширити діапазон вимірюваних параметрів, збільшити швидкодію та надійність пристроїв [7]—[9].

У межах цієї роботи розроблено схему перетворювача температури з частотним виходом, проведено визначення функції перетворення частотного перетворювача на основі нанокompatитної гетерометалічної комплексної сполуки — тетракіс- μ_3 -(метоксо)(метанол)-пентакіс(ацетилацетонато) (трикупрум(II), неодим(III)) метанол (I) складу $[\text{Cu}_3\text{Nd}(\text{AA})_5(\text{OCH}_3)_4\text{CH}_3\text{OH}]\cdot\text{CH}_3\text{OH}$, де $\text{HAA} = \text{H}_3\text{C}-\text{C}(\text{O})-\text{CH}_2-\text{C}(\text{O})-\text{CH}_3$.

Метою дослідження є аналіз терморезистивних властивостей гетерометалічного ацетилацетонату, що містить йони купруму та неодиму та інтеграція цього матеріалу у схему перетворювача температури

Результати дослідження

З метою пошуку нових гетерометалічних комплексних сполук з напівпровідниковими властивостями розроблено методику синтезу сполуки тетракіс- μ_3 -(метоксо)(метанол)-пентакіс(ацетилацетонато)(трикупрум(II), неодим(III)) метанол (I) складу $[\text{Cu}_3\text{Nd}(\text{AA})_5(\text{OCH}_3)_4\text{CH}_3\text{OH}]\cdot\text{CH}_3\text{OH}$, де $\text{HAA} = \text{H}_3\text{C}-\text{C}(\text{O})-\text{CH}_2-\text{C}(\text{O})-\text{CH}_3$ (рис. 1).

Для синтезованої сполуки проведено елементний аналіз, а також магнетохімічні, ІЧ-спектроскопічні та термогравіметричні дослідження. На основі отриманих результатів встановлено, що склад сполуки (I) відповідає формулі $[\text{Cu}_3\text{Nd}(\text{AA})_5(\text{OCH}_3)_4\text{CH}_3\text{OH}]\cdot\text{CH}_3\text{OH}$, де $\text{HAA} = \text{H}_3\text{C}-\text{C}(\text{O})-\text{CH}_2-\text{C}(\text{O})-\text{CH}_3$.

Аналіз експериментальних даних фізико-хімічних досліджень виділеної сполуки (I) дав змогу запропонувати схему просторового розташування хімічних зв'язків у її структурі.

Для визначення електропровідності порошкоподібного зразка застосовано спеціально розроблену пресувальну установку. З її допомогою сформовано циліндричний зразок масою 0,125 г та об'ємом $17,74 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$. На основі цих параметрів за формулою (1) обчислено густину зразка у спресованому стані

$$\rho = m/v = 7,046 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \quad (1)$$

де ρ — густина речовини, m — маса, v — об'єм зразка.

Для комплексу $[\text{Cu}_3\text{Nd}(\text{AA})_5(\text{OCH}_3)_4\text{CH}_3\text{OH}]$ (I) визначено молярну масу 985,5 г/моль і кількість валентних електронів — 270. Масу однієї молекули розраховано за формулою

$$m_0 = M/N_A = 163,65 \cdot 10^{-20} \text{ кг}, \quad (2)$$

де M — молярна маса сполуки (I), N_A — число Авогадро.

Експериментальні результати свідчать, що в температурному діапазоні 303...423 К питомий опір пресованого зразка досліджуваної сполуки (I) зменшується з $2 \cdot 10^{12}$ до $5 \cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Така залежність опору від температури підтверджує, що синтезована речовина має напівпровідникові властивості.

На основі отриманих даних розраховано питомі значення електропровідності для двох контрольних температур. Для температури $T_1 = 303 \text{ К}$ питома провідність становить $\sigma_1 = 5,0 \cdot 10^{-11} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$, а для $T_2 = 423 \text{ К}$ — $\sigma_2 = 2,0 \cdot 10^{-3} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$.

Використовуючи ці значення, визначено енергетичну ширину забороненої зони матеріалу, що характеризує його електронну структуру та тип провідності.

$$\Delta E = \frac{k \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2}}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} = 2,58 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,6125 \text{ eV}, \quad (3)$$

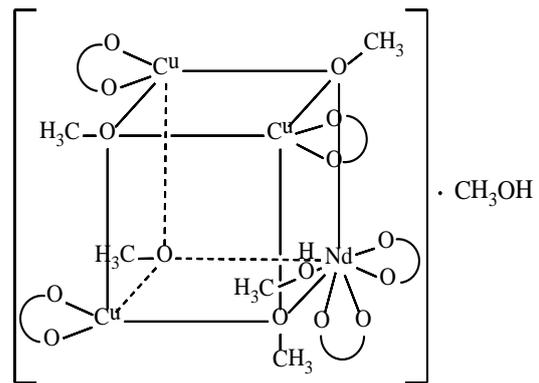


Рис. 1. Схематичне зображення просторової будови тетракіс- μ_3 -(метоксо)(метанол)-пентакіс(ацетилацетонато)(трикупрум(II), неодим(III)) метанолу (I)

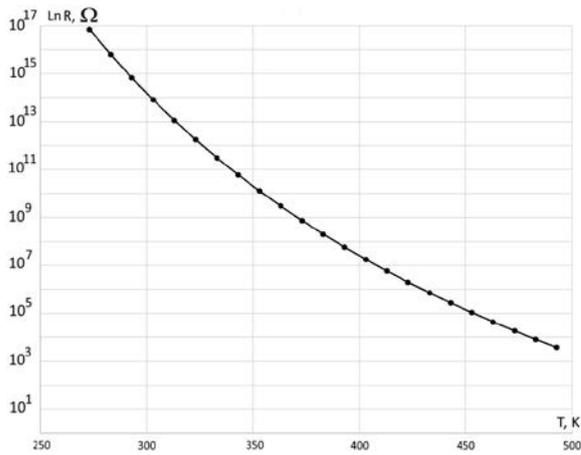


Рис. 2. Залежність електричного опору матеріалу з геометричними розмірами зразка $(1 \times 0,5 \times 0,5) \cdot 10^{-3}$ м від температури

де ΔE — ширина забороненої зони комплексної сполуки $[\text{Cu}_3\text{Nd}(\text{AA})_5(\text{OCH}_3)_4\text{CH}_3\text{OH}]$ (I); k — стала Больцмана; T — абсолютна температура; σ — питома електропровідність матеріалу.

Проведені розрахунки підтвердили, що отримана речовина дійсно проявляє напівпровідникові властивості, причому перенос заряду в ній здійснюється як електронами, так і дірками, тобто має місце двополярна провідність.

З метою практичного використання сполуки як термочутливого елемента, досліджуваний матеріал додатково спресовано у форму SMD-терморезистора типу 0402 з геометричними параметрами $(1 \times 0,5 \times 0,5) \cdot 10^{-3}$ м.

Графічне відображення залежності електричного опору досліджуваного матеріалу від температури показано на рис. 2.

Математична модель частотного перетворювача температури

На рис. 3 показана електрична схема частотного перетворювача температури на основі нанокompatивної гетерометалічної комплексної сполуки — тетракіс- μ 3-(метоксо)(метанол)-пентакіс(ацетил-ацетонато)(трикупрум(II), неодим(III)) метанол (I) складу $[\text{Cu}_3\text{Nd}(\text{AA})_5(\text{OCH}_3)_4\text{CH}_3\text{OH}] \cdot \text{CH}_3\text{OH}$, де НАА = $\text{H}_3\text{C}-\text{C}(\text{O})-\text{CH}_2-\text{C}(\text{O})-\text{CH}_3$.— R1, яка складається з МДН-транзистора VT1 та біполярного транзистора VT2 та VT3, живлення яких здійснюють джерела напруги U1 та U2.

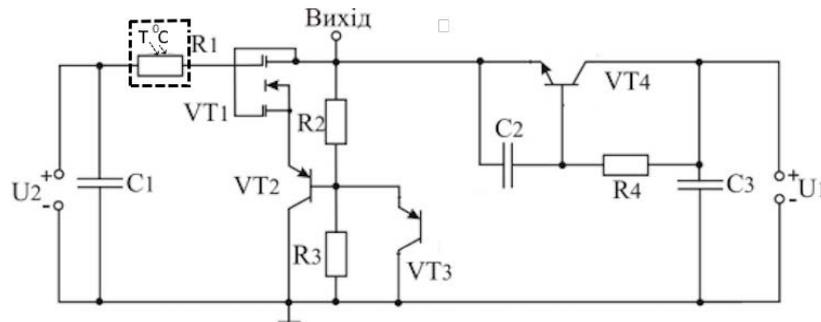


Рис. 3. Електрична схема частотного перетворювача температури

Індуктивну складову в схемі забезпечує біполярний транзистор VT4 разом з RC-ланцюгом, що складається з конденсатора C2 та резистора R4. Таким чином, коливальний контур формується за рахунок ємнісної складової повного опору на електродах колектор–стік транзисторів VT1 і VT2 та індуктивної складової повного опору на електродах емітер–колектор транзистора VT3.

Для визначення функції перетворення перетворювача необхідно розрахувати повний опір на електродах колектор–стік транзисторів VT2 та VT1 згідно з його еквівалентною схемою для змінного струму (рис. 4).

В еквівалентній схемі (рис. 4) використано такі позначення:

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= R_1; & Z_2 &= R_5; & Z_3 &= R_2 / (1 + \omega^2 R_2^2 C_4^2) - j R_2^2 \omega C_4 / (1 + \omega^2 R_2^2 C_4^2); & Z_4 &= R_3; & Z_5 &= R_4; & Z_6 &= R_7; \\
 Z_7 &= -j / (\omega C_8); & Z_8 &= -j / (\omega C_7); & Z_9 &= -j / (\omega C_1); & Z_{10} &= R_6; & Z_{11} &= -j / (\omega C_3); & Z_{12} &= -j / (\omega C_5); \\
 Z_{13} &= R_8; & Z_{14} &= -j / (\omega C_6); & Z_{15} &= R_9 / (1 + \omega^2 R_9^2 C_9^2) - j R_9^2 \omega C_9 / (1 + \omega^2 R_9^2 C_9^2); & Z_{16} &= R_{10}; & Z_{17} &= R_{11}; \\
 Z_{18} &= R_{12}; & Z_{19} &= -j / (\omega C_{10}); & Z_{20} &= R_{13}; & Z_{21} &= -j / (\omega C_4); & Z_{22} &= R_{14}; & Z_{23} &= -j / (\omega C_{12}); & Z_{24} &= R_{15}; \\
 Z_{25} &= R_{16}; & Z_{26} &= R_{17}; & Z_{27} &= R_{20}; & Z_{28} &= -j / (\omega C_{17}); & Z_{29} &= -j / (\omega C_{18}); & Z_{31} &= R_{19}; & Z_{32} &= R_{21}; \\
 Z_{30} &= R_{18} / (1 + \omega^2 R_{18}^2 C_{19}^2) - j R_{18}^2 \omega C_{19} / (1 + \omega^2 R_{18}^2 C_{19}^2); & Z_{33} &= -j / (\omega C_2); & Z_{34} &= -j / (\omega C_{13}); & Z_{35} &= -j / (\omega C_{14}); \\
 Z_{36} &= R_{22} / (1 + \omega^2 R_{22}^2 C_{15}^2) - j R_{22}^2 \omega C_{15} / (1 + \omega^2 R_{22}^2 C_{15}^2); & Z_{37} &= R_{23}; & Z_{38} &= R_{25}; & Z_{39} &= R_{24}; & Z_{40} &= -j / (\omega C_{16}),
 \end{aligned}$$

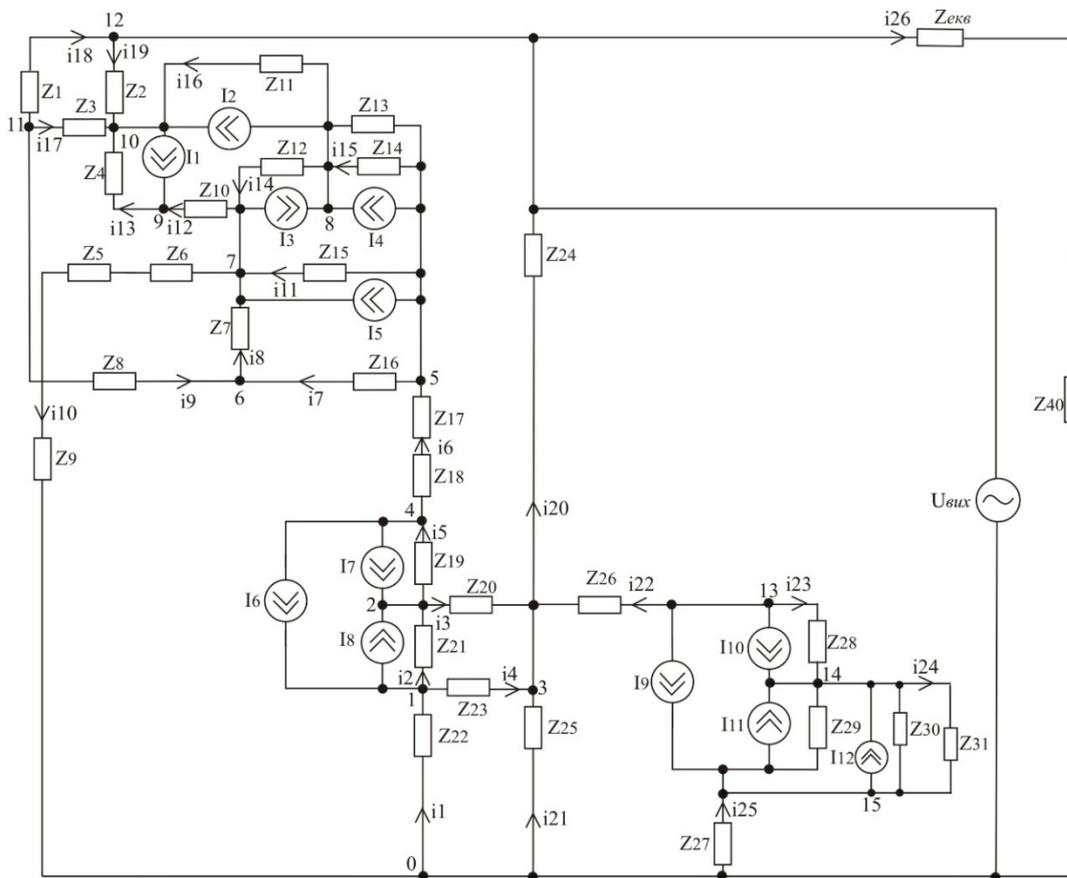


Рис. 4. Перетворена еквівалентна схема температурного перетворювача по змінному струму

де R_1 — опір другого затвору МДН-транзистора VT1; R_2 — опір стік-другий затвор двозатворного МДН-транзистора VT1; R_3, R_6, R_9 — опори витоку-стоку двозатворного МДН-транзистора VT1; R_4 — опір терморезистора R_1 на схемі рис. 3; R_5 — опір p-n переходу стоку транзистора VT1; R_7 — омичний опір другого затвору двозатворного МДН-транзистора VT1; R_8 — опір підкладки МДН-транзистора VT1; R_{10} — опір витік-перший затвор двозатворного МДН-транзистора VT1; R_{11} — опір витоку МДН-транзистора VT1; R_{12}, R_{17}, R_{21} — опори емітера біполярного транзистора VT2 та транзисторів VT2 та VT3 відповідно; R_{13} — опір бази біполярного транзистора VT2; R_{14}, R_{20}, R_{25} — опори колектора біполярного транзистора VT2 та транзисторів VT2 та VT3 відповідно; R_{15} — опір резистора R_2 на схемі рис. 3; R_{16} — опір резистора R_3 на схемі рис. 3; R_{18} та R_{22} — шунтувальний опір, що входить до складу транзистора VT3 та транзистора VT4 відповідно; R_{19} та R_{23} — опір p-n переходу діода, що входить до складу транзистора VT3 та транзистора VT4 відповідно; R_{24} — опір резистора R_4 на схемі рис. 3; C_1, C_2 та C_{16} — ємності конденсаторів C_1, C_2 та C_3 на схемі рис. 3 відповідно; C_3 та C_5 — ємності підкладка-стік МДН-транзистора VT1; C_4 та C_9 — ємності перший затвор-стік МДН-транзистора VT1; C_6 — ємність підкладка-витік МДН-транзистора VT1; C_7 — ємність між першим і другим затвором МДН-транзистора VT1; C_8 — ємність затвор-стік МДН-транзистора VT1; C_{10}, C_{11} — ємності переходу база-емітер та база-колектор транзистора VT2 відповідно; C_{12} — ємність між зовнішнім виводом бази і колектора транзистора VT2; C_{13}, C_{14} — ємність переходу база-емітер та база-колектор транзистора VT4 відповідно; C_{15} та C_{19} — ємності p-n переходів діодів транзисторів VT4 та VT3 відповідно; C_{17}, C_{18} — ємність переходу база-емітер та база-колектор транзистора VT3 відповідно.

Струми $I_6, I_7, I_9, I_8, I_{10}, I_{11}, I_{13}, I_{14}, I_{15}$, що входять до складу еквівалентних схем біполярного транзистора VT2 та транзисторів VT3 і VT4 відповідно, та струми МДН-транзистора $I_1, I_3, I_4, I_5, I_{12}, I_{16}$ описані в роботі [5].

На основі перетвореної еквівалентної схеми (рис. 4) для розрахунку повного опору схеми складемо систему рівнянь Кірхгофа, використавши метод вузлових потенціалів. Система рівнянь Кірхгофа для змінного струму має такий вигляд:

$$\begin{cases} I_8 - I_6 = -\phi_1 (y_1 + y_2 + y_4) + \phi_2 y_2 + \phi_3 y_4, \\ -(I_7 + I_8) = \phi_1 y_2 - \phi_2 (y_2 + y_3 + y_5) + \phi_3 y_3 + \phi_4 y_5, \\ 0 = \phi_1 y_4 + \phi_2 y_3 - \phi_3 (y_{20} + y_{21} + y_4 + y_3 + y_{22}) + \phi_{12} y_{20} + \phi_{17} y_{22}, \\ I_7 + I_6 = \phi_2 y_5 - \phi_4 (y_5 + y_6) + \phi_5 y_6, \\ I_5 + I_4 = \phi_4 y_6 - \phi_5 (y_6 + y_7 + y_{11} + y_{15}) + \phi_6 y_7 + \phi_7 y_{11} + \phi_8 y_{15}, \\ 0 = \phi_5 y_7 - \phi_6 (y_7 + y_8 + y_9) + \phi_7 y_8 + \phi_{11} y_9, \\ I_3 - I_5 = \phi_5 y_{11} + \phi_6 y_8 - \phi_7 (y_8 + y_{10} + y_{11} + y_{12} + y_{14}) + \phi_8 y_{14} + \phi_9 y_{12}, \\ I_2 - I_3 - I_4 = \phi_5 y_{15} + \phi_7 y_{14} - \phi_8 (y_{15} + y_{16} + y_{14}) + \phi_{10} y_{16}, \\ -I_1 = \phi_7 y_{12} - \phi_9 (y_{12} + y_{13}) + \phi_{10} y_{13}, \\ I_1 - I_2 = \phi_8 y_{16} + \phi_9 y_{13} - \phi_{10} (y_{13} + y_{16} + y_{17} + y_{19}) + \phi_{11} y_{17} + \phi_{12} y_{19}, \\ 0 = \phi_6 y_9 + \phi_{10} y_{17} - \phi_{11} (y_9 + y_{17} + y_{18}) + \phi_{12} y_{18}, \\ U_{\text{вих}} (y_{18} + y_{19} + y_{20} + y_{26}) = \phi_3 y_{20} + \phi_{10} y_{19} + \phi_{11} y_{18}, \\ I_{10} + I_9 = \phi_3 y_{22} - \phi_{13} (y_{22} + y_{23}) + \phi_{14} y_{23}, \\ -I_{10} - I_{11} - I_{12} = \phi_{13} y_{23} - \phi_{14} (y_{23} + y_{24}) + \phi_{15} y_{24}, \\ -I_9 + I_{11} + I_{12} = \phi_{14} y_{24} - \phi_{15} (y_{25} + y_{24}), \end{cases} \quad (4)$$

де провідності гілок схеми визначаються за формулами

$$\begin{aligned} y_1 &= 1/Z_{22}; \quad y_2 = 1/Z_{21}; \quad y_3 = 1/Z_{20}; \quad y_4 = 1/Z_{23}; \quad y_5 = 1/Z_{19}; \quad y_6 = 1/(Z_{17} + Z_{18}); \quad y_7 = 1/Z_{16}; \\ y_8 &= 1/Z_7; \quad y_9 = 1/Z_8; \quad y_{10} = 1/Z_9; \quad y_{11} = 1/Z_{15}; \quad y_{12} = 1/Z_{10}; \quad y_{13} = 1/Z_4; \quad y_{14} = 1/Z_{12}; \\ y_{15} &= (Z_{13} + Z_{14})/(Z_{13}Z_{14}); \quad y_{16} = 1/Z_{11}; \quad y_{17} = 1/Z_3; \quad y_{18} = Z_1; \quad y_{19} = 1/Z_2; \quad y_{20} = 1/Z_{24}; \\ y_{21} &= 1/Z_{25}; \quad y_{22} = 1/Z_{26}; \quad y_{23} = 1/Z_{28}; \quad y_{24} = (Z_{29} + Z_{30} + Z_{31})/(Z_{29}Z_{30}Z_{31}); \quad y_{25} = 1/Z_{27}; \quad y_{26} = 1/(Z_{\text{екв}} + Z_{40}). \end{aligned} \quad (5)$$

Для визначення функції перетворення на основі розв'язання системи рівнянь Кірхгофа (4) варто встановити залежність частоти генерації від температури. У цьому випадку функція перетворення набуде такого вигляду:

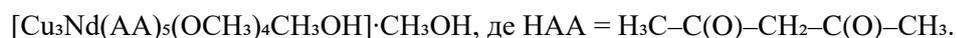
$$F = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2} \sqrt{L_{\text{екв}}(T)C_{17} \left(-L_{\text{екв}}(T)C_{17} + R_{19}^2(T)C_{19}^2(T) + R_{19}^2(T)C_{19}(T)C_{17} + A \right)}}{L_{\text{екв}}(T)C_{19}(T)C_{17}R_{19}(T)}, \quad (6)$$

$$\text{де } A = \sqrt{L_{\text{екв}}^2(T)C_{17}^2 + 2L_{\text{екв}}(T)C_{19}^2(T)C_{17}R_{19}^2(T) - 2L_{\text{екв}}(T)C_{17}C_{19}(T)R_{19}^2(T) + R_{19}^4(T)C_{19}^4(T) + 2R_{19}^4(T)C_{19}^3(T)C_{17} + R_{19}^4(T)C_{19}^2(T)C_{17}^2},$$

де $L_{\text{екв}}$ — значення активного індуктивного елемента, що визначається з повного опору.

Висновки

У роботі досліджено нову гетерометалічну комплексну сполуку — тетракіс- μ_3 -(метоксо)(метанол)-пентакіс(ацетилацетонато)(трикупрум(II), неодим(III)) метанол (I) складу



Для зазначеного комплексу визначено молярну масу (985,5 г/моль), кількість валентних електронів у молекулі (270), масу однієї молекули, а також визначено загальну кількість молекул у циліндричному зразку масою 0,125 г і об'ємом $17,74 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$. Додатково розраховано загальне число валентних електронів у зразку.

Встановлено, що в температурному інтервалі 303...423 К питомий опір пресованого порошку

зменшується від $2 \cdot 10^{12}$ до $5 \cdot 10^4$ Ом·см, що свідчить про напівпровідниковий характер отриманої речовини. Ширина забороненої зони становить 1,61 еВ.

Розроблена математична модель частотного перетворювача температури, на основі автогенератора з біполярного та польового транзисторів з тетракіс- μ_3 -(метоксо)(метанол)-пентакіс (ацетилацетонато)(трикупрум(II), неодим(III)) метанол (I) як чутливого елемента та активним індуктивним елементом. На основі моделі отримано вираз функції перетворення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. Вуйцік, З. Ю. Готра, В. В. Григор'єв, В. Каліта, О. М. Мельник, і Є. Потенці, *Мікроелектронні сенсори фізичних величин*, З. Ю. Готра, Ред., т. 1, Львів, Україна: Ліга-Прес, 2003, 473 с.
- [2] В. Вуйцік, та ін., *Мікроелектронні сенсори фізичних величин*, З. Ю. Готра, Ред., т. 2, Львів, Україна: Ліга-Прес, 2003, 595 с.
- [3] О. З. Готра, *Мікроелектронні елементи та пристрої для термометрії*, Львів, Україна: Ліга-Прес, 2001, 487 с.
- [4] R. A. Layfield, "Organometallic Single-Molecule Magnets," *Organometallics*, vol. 33, pp. 1084-1099, 2014.
- [5] L. B. L. Escobar et al., "Synthesis, Crystal Structures, and EPR Studies of First Mn–Ln Hetero-binuclear Complexes," *Inorganic Chemistry*, vol. 57, no. 1, pp. 326-334, 2018.
- [6] V. V. Krisyuk et al., "Volatile Pd–Pb and Cu–Pb heterometallic complexes...", *Journal of Coordination Chemistry*, vol. 68, no. 11, pp. 1890-1902, 2015.
- [7] О. В. Осадчук, *Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором*, Вінниця, Україна: Універсум-Вінниця, 2000, 303 с.
- [8] O. Osadchuk et al., "The impact of temperature and magnetic field...", in *Proc. IEEE TCSET 2020*, Lviv–Slavske, Ukraine, Feb. 25–29, 2020, pp. 511-515. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235485>.
- [9] A. Semenov et al., "Electrical Properties of the (Copper, Dysprosium)-Containing Complex Compound," in *IFMBE Proc.*, vol. 91 (ICNBME 2023), Springer, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42775-6_4.

Рекомендована кафедрою інформаційних радіоелектронних технологій і систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 21.11.2025

Мартинюк Володимир Валерійович — канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

V. V. Martyniuk

Temperature-to-Frequency Converter Based on a Nanocomposite Semiconductor Material

¹Vinnitsia National Technical University

The study presents the results of investigating a new heterometallic complex compound — tetrakis- μ_3 -(methoxo)(methanol)-pentakis(acetylacetonato)(tricopper(II), neodymium(III)) methanol (I) of the composition $[Cu_3Nd(AA)_5(OCH_3)_4CH_3OH] \cdot CH_3OH$, where HAA = $H_3C-C(O)-CH_2-C(O)-CH_3$. For the synthesized compound, elemental analysis as well as magnetochemical, IR-spectroscopic, and thermogravimetric studies were performed. Based on the experimental results, it was confirmed that the composition of compound (I) corresponds to the given chemical formula.

For this complex, the molar mass (985.5 g/mol) was calculated, along with the number of valence electrons in a molecule (270), the mass of a single molecule, and the total number of molecules in a cylindrical sample with a mass of 0.125 g and a volume of $17.74 \cdot 10^{-9}$ m³. Additionally, the total number of valence electrons in the sample was determined.

It was shown that in the temperature range of 303–423 K, the specific resistance of the pressed powder decreases from $2 \cdot 10^{12}$ to $5 \cdot 10^4$ $\Omega \cdot cm$, which confirms the semiconductor nature of the studied substance. The band gap width was found to be 1.61 eV. The performed calculations demonstrated that the obtained compound exhibits semiconductor behavior with bipolar conductivity, meaning that charge transport occurs through both electrons and holes.

To evaluate the practical applicability of the compound as a temperature-sensitive element, the investigated material was additionally pressed into the form of an SMD thermistor of type 0402 with geometric dimensions of $(1 \times 0,5 \times 0,5) \cdot 10^{-3}$ m.

Mathematical model of a temperature-to-frequency converter based on the nanocomposite material tetrakis- μ_3 -(methoxo)(methanol)-pentakis(acetylacetonato)(tricopper(II), neodymium(III)) methanol (I) with an active inductive element was developed. The structure of the device includes three bipolar and MOS transistors. To determine the conversion function, a system of Kirchhoff equations was solved, establishing the dependence of the generation frequency on temperature and obtaining an analytical expression for the conversion function.

Keywords: temperature converter, bipolar transistor, field-effect transistor, nanocomposite material.

Martyniuk Volodymyr V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of General Physics, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua