

ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З СЕНСОРОМ ХОЛЛА НА ОСНОВІ ГЕТЕРОМЕТАЛЕВОЇ КОМПЛЕКСНОЇ СПОЛУКИ

DOI 10.36994/2788-5518-2022-01-03-10

Осадчук О.В., д.т.н., проф. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.
osadchuk.av69@gmail.com

Осадчук В.С., д.т.н., проф. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, osadchuk.vs38@gmail.com

Мартинюк В.В., к.т.н., доц. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна. gyravl6@gmail.com

Євсєєва М.В., к.хім.н., доц. Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова, Вінниця, Україна. evseevamv359@gmail.com

Мартинюк Г.І. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.
martunyukg@gmail.com

Анотація: Розроблено новий магніточутливий елемент на основі синтезованого напівпровідникового матеріалу. Розроблено методику синтезу комплексної сполуки – тетракіс- μ_3 -(метоксо)(метанол)пентакіс-(ацетилацетонато)(трикупрум(II), ітрії(III)) метанол (I). Запропоновано схему розміщення хімічних зв'язків для даної комплексної сполуки. Проведені дослідження електропровідних властивостей тетракіс- μ_3 -(метоксо)(метанол)пентакіс-(ацетилацетонато)- (трикупрум(II), ітрії(III)) метанолу (I) в спресованому вигляді в інтервалі температур 273 – 493 K показали, що при підвищенні температури його питомий опір різко зменшується від $7,72 \cdot 10^{13}$ Ом·м до 1,53 Ом·м, що є типовим для напівпровідникових матеріалів. Напруга Холла в діапазоні від 1 мТ до 200 мТ зростає від $1,16 \cdot 10^{-5}$ В до $2,31 \cdot 10^{-4}$ В, а від 400 мТ до 1000 мТ – зміна Холлівської напруги носить лінійний характер і змінюється від $4,62 \cdot 10^{-4}$ В до $1,16 \cdot 10^{-3}$ В. На основі розробленого сенсора Холла запропоновано схемотехнічне рішення частотного перетворювача магнітного поля. Частотний перетворювач магнітного поля представляє собою гібридну інтегральну схему, що складається з чотирьох біполярних транзисторів з однаковими типами провідності, що створює передумови створення автогенераторного пристрою, у ланцюг зворотного позитивного зв'язку якого включений сенсор Холла, створений на основі тетракіс- μ_3 -(метоксо)(метанол)-пентакіс-(ацетилацетонато) (трикупрум(II), ітрії(III)) метанол (I). Частота генерації розробленого перетворювача найбільше зростає в діапазоні від 10^{-3} Т до 0,06 Т, та при напрузі живлення 5,0 В змінюється від 435,000 МГц до 435,71 МГц, а у всьому діапазоні зміни індукції магнітного поля змінюється від 435,000 МГц до 436,075 МГц. Чутливість розробленого частотного перетворювача магнітного поля складає від 3,5 кГц/мТ до 5,5 кГц/мТ.

Ключові слова: частотний перетворювач магнітного поля, комплексна сполука, магнітне поле, температура, провідність, частота генерації, від'ємний диференційний опір.

FREQUENCY TRANSDUCER OF MAGNETIC FIELD WITH HALL SENSOR BASED ON HETEROMETALLIC COMPLEX COMPOUND

Alexander Osadchuk, Dr.habil., Prof. Vinnytsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine.
osadchuk.av69@gmail.com

Vladimir Osadchuk, Dr.habil., Prof. Vinnytsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine,
osadchuk.vs38@gmail.com

Vladimir Martynyuk, Ph.D., Ass. Prof. Vinnytsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine,
gyravl6@gmail.com

Mariy Evseeva, Ph.D., Ass. Prof. National Pirogov Memorial Medical University, Vinnitsia, Ukraine,
evseevamv359@gmail.com

Galina Martynyuk. Vinnytsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine, martunyukg@gmail.com

Abstract: A new magnetically sensitive element based on a synthesized semiconductor material has been developed. A procedure has been developed for the synthesis of a complex compound - tetrakis- μ_3 -(methoxo) (methanol) pentakis- (acetylacetonato) (tricuprum (II), yttrium (III)) methanol (I). A diagram of the arrangement of chemical bonds for this complex compound is proposed. The conducted studies of the electrically conductive properties of tetrakis- μ_3 -(methoxo) (methanol) pentakis (acetylacetonato) - (tricuprum (II), yttrium (III)) methanol (I) in a compressed form in the temperature range 273 - 493 K showed that with an increase in temperature its resistivity drops sharply from $7.72 \cdot 10^{13}$ Ohm·m to 1.53 Ohm·m, which is typical for semiconductor materials. The Hall voltage in the range from 1 mT to 200 mT increases from $1.16 \cdot 10^{-5}$ V to $2.31 \cdot 10^{-4}$ V, and from 400 mT to 1000 mT - the change in the Hall voltage is linear and varies from $4.62 \cdot 10^{-4}$ V to $1.16 \cdot 10^{-3}$ V. On the basis of the developed Hall sensor, a schematic solution of

the frequency transducer of the magnetic field is proposed. The frequency transducer of the magnetic field is a hybrid integrated circuit consisting of four bipolar transistors with the same types of conductivity, which creates the prerequisites for the creation of an auto-oscillator device, in the positive feedback circuit of which a Hall sensor is included, created on the basis of tetrakis- μ_3 -(methoxo) (methanol)-pentakis (acetylacetonato) (tricuprum (II), yttrium (III)) methanol (I). The generation frequency of the developed transducer increases more in the range from 10^{-3} T to 0.06 T, and at a supply voltage of 5.0 V changes from 435,000 MHz to 435.71 MHz, and in the entire range of variation of the magnetic field induction changes from 435,000 to 436.075 MHz. The sensitivity of the developed frequency transducer of the magnetic field ranges from 3.5 kHz /mT to 5.5 kHz /mT.

Key words: frequency transducer of magnetic field, complex compound, magnetic field, temperature, conductivity, generation frequency, negative differential resistance.

Вступ

Одним з нових напрямків в розробці мікроелектронних перетворювачів магнітного поля є створення частотних перетворювачів магнітної індукції на основі напівпровідникових структур з від'ємним опором та нанокомпозитними матеріалами як матеріалом для первинних перетворювачів магнітного поля (сенсорів). Проте застосування гетерометалевих комплексних сполук в якості чутливих елементів частотних вимірювачів магнітного поля, досліджено на недостатньому рівні [1-3].

Використання принципу „магнітна індукція – частота” на основі транзисторних структур з від'ємним опором виключає використання аналого-цифрових перетворювачів при обробці сигналів, що знижує собівартість систем контролю і управління. Крім того, мікроелектронні частотні магнітні перетворювачі поєднують як простоту так і універсальність, які властиві аналоговим пристроям, а також точність і завадостійкість характерними для перетворювачів з кодовим виходом, володіють високою чутливістю до вимірювальних параметрів, малою масою, габаритами, інформаційною та конструктивною і технологічною сумісністю з мікроелектронними засобами обробки інформації. Що і є перевагою їх перед існуючими перетворювачами магнітної індукції [4-8].

Теоретичні та експериментальні дослідження

З метою пошуку нових гетерометалічних β -дикетонатів, які володіють напівпровідниковими властивостями була розроблена методика синтезу комплексної сполуки – тетракіс- μ_3 -(метоксо)(метанол)-пентакіс(ацетилацетонато)(трикупрум(II), ітрії(III)) метанол (I), такого складу: $[\text{Cu}_3\text{Y}(\text{AA})_5(\text{OCH}_3)_4\text{CH}_3\text{OH}] \cdot \text{CH}_3\text{OH}$, де НАА = $\text{H}_3\text{C}-\text{C}(\text{O})-\text{CH}_2-\text{C}(\text{O})-\text{CH}_3$.

Детальний аналіз отриманих експериментальних даних фізико-хімічних методів дослідження дозволяє запропонувати таку схему розміщення хімічних зв'язків для комплексної сполуки (I) (рис. 1) [6]:

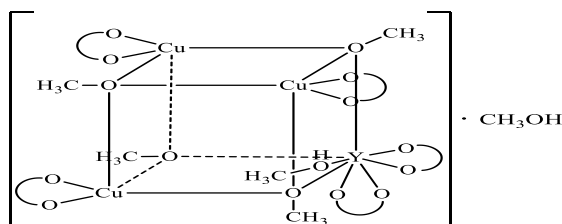


Рис. 1. Схема розміщення хімічних зв'язків в тетракіс- μ_3 -(метоксо)(метанол),пентакіс(ацетилацетонато)(трикупрум(II), ітрії(III)) метанол (I)

Для даної сполуки було розраховано ширину забороненої зони $\Delta E = 1,664 \text{ eV}$, це підтвердило, що даний матеріал є напівпровідником, та дало можливість провести теоретичні розрахунки залежностей електрофізичних параметрів β -дикетоната від температури та магнітного поля.

Графічну залежність питомого опору від температури подано на рис. 2.

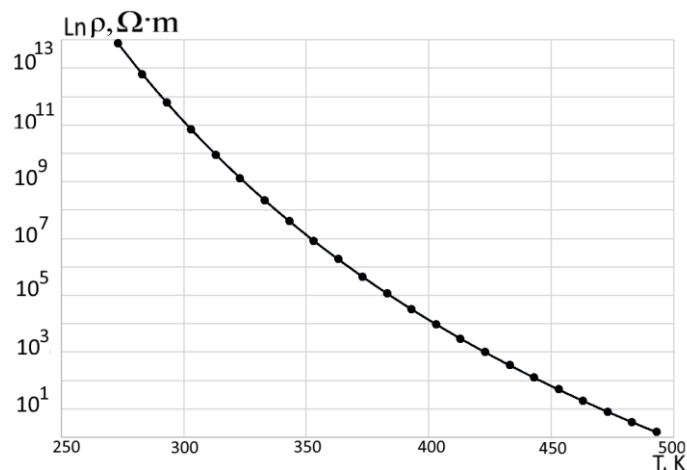


Рис. 2. Залежність питомого опору матеріалу від температури

Як видно з графіку питомий опір матеріалу в діапазоні від 273 К до 493 К спадає від $7,72 \cdot 10^{13}$ Ом·м до 1,53 Ом·м. Для використання *тетракіс-μ₃-(метоксо)(метанол) пентакіс(ацетилацетонато)- (трикупрум(II), ітрії(III)) метанол (I)* у якості сенсора Холла, досліджуваний зразок було спресовано по аналогії з ПХЕМ 6028175, що виготовлено із InSb-GaAs, з геометричними розмірами $2 \cdot 10^{-3}$ м $\times$ $0,5 \cdot 10^{-3}$ м $\times$ $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. Для таких геометричних розмірів було отримано залежність опору матеріалу від температури, яка подана на рис.3.

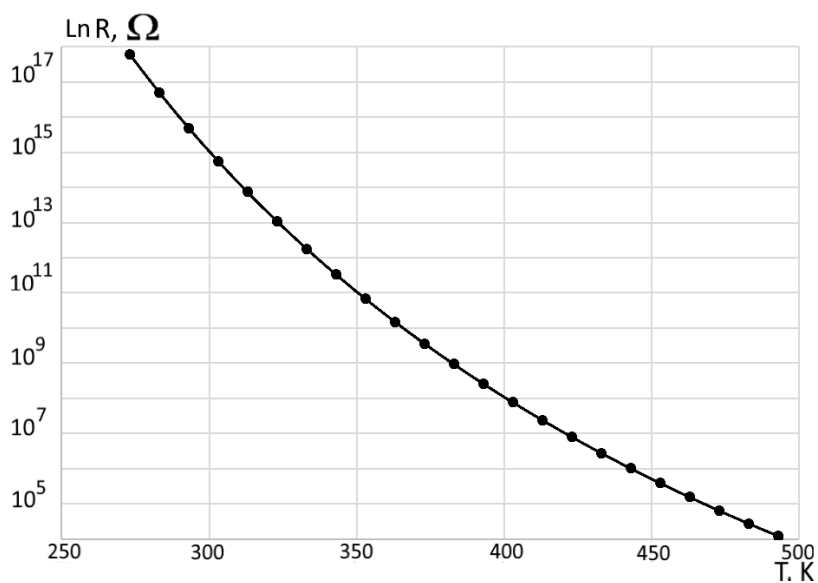


Рис. 3. Залежність опору матеріалу від температури

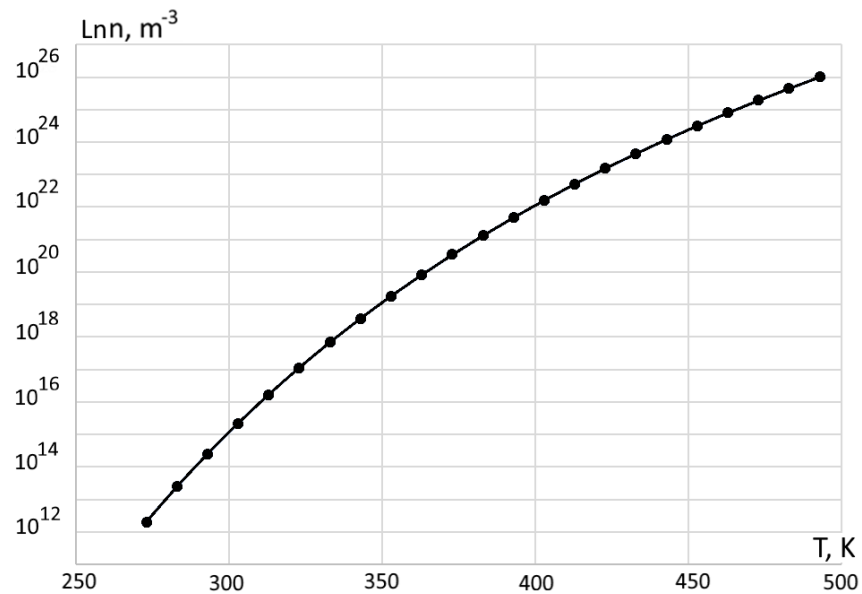


Рис. 4. Залежність концентрації носіїв заряду від температури

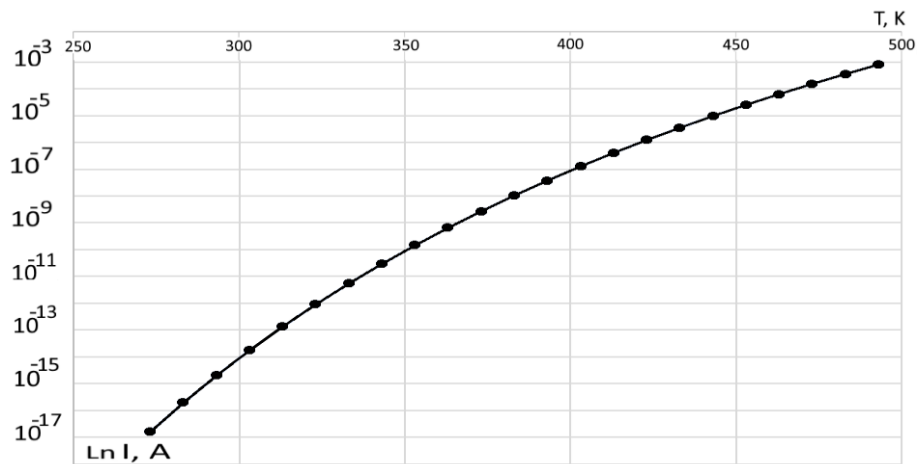


Рис. 5. Залежність величини струму від температури

Як видно з рисунку, величина струму при температурі 273 К, та напрузі живлення 10 В, становить $1,6 \cdot 10^{-17}$ А, а при температурі 493 К складає $8,1 \cdot 10^{-4}$ А. Рухливість носіїв заряду становить $4,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ і не залежить від температури. Залежність напруги Холла від індукції магнітного поля подано на рис.6.

З графіку видно, що в діапазоні від 1 до 200 мТ напруга Холла зростає від $1,16 \cdot 10^{-5}$ В до $2,31 \cdot 10^{-4}$ В, а від 400 мТ до 1000 мТ – зміна Холлівської напруги носить лінійний характер і змінюється від $4,62 \cdot 10^{-4}$ В до $1,16 \cdot 10^{-3}$ В. Тобто використання *тетракіс-μз-(метоксо)(метанол)пентакіс(ацетилацетонато)- (трикупрум(II), ітрії(III)) метанол (I)* у якості сенсора Холла є досить перспективним.

На основі розробленого сенсора Холла запропоновано схемотехнічне рішення частотного перетворювача магнітного поля, який представлено на рис. 7.

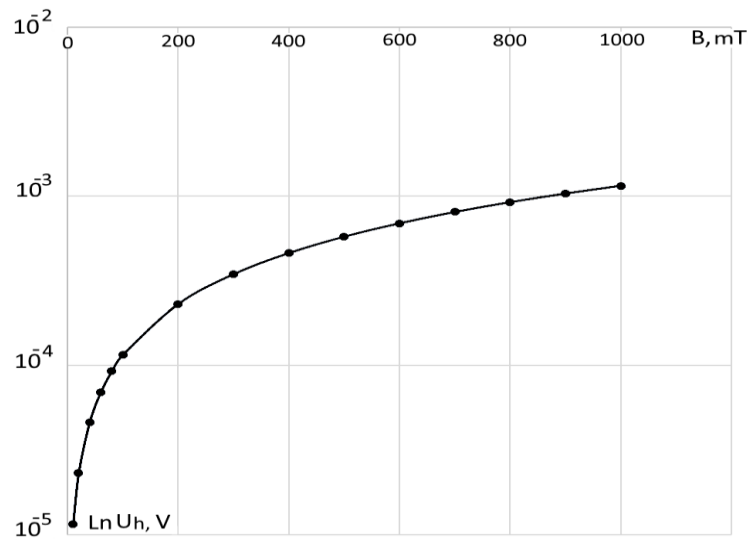


Рис.6. Залежність напруги Холла від індукції магнітного поля

З метою вивчення властивостей частотного перетворювача магнітної індукції на основі біполярних транзисторів необхідно розробити математичну модель, яка дозволила б отримати аналітичні залежності функцій перетворення і чутливості від дій індукції магнітного поля.

Електрична схема перетворювача приведена на рис.7, вона являє собою гібридну інтегральну схему, що складається з чотирьох біполярних транзисторів з однаковими типами провідності, що створює передумови створення автогенераторного пристрою, у ланцюг зворотного позитивного зв'язку якого включений сенсор Холла, створений на основі тетракіс- μ_3 -(метоксо)(метанол)-пентакіс(ацетилацетонато)(трикупрум(II), ітрій(III)) метанол (I).

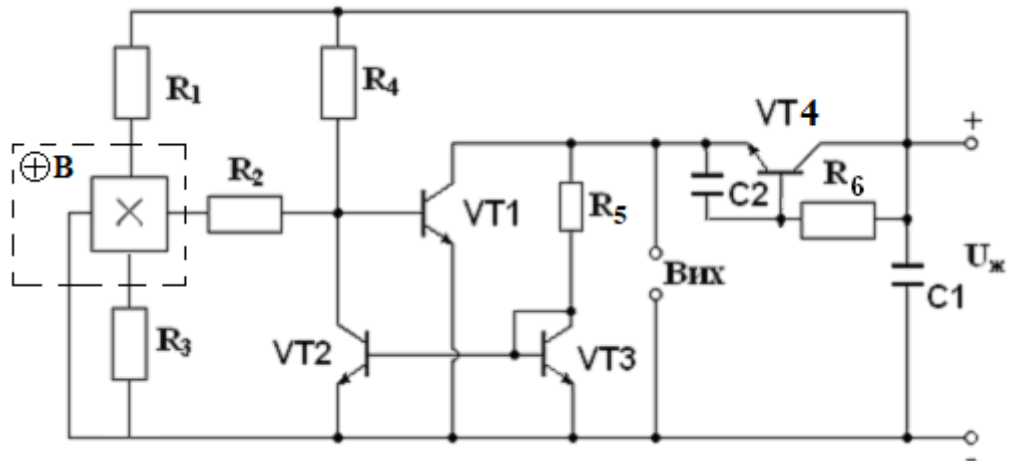


Рис.7. Електрична схема частотного перетворювача магнітного поля

На електродах колектор-емітер транзисторів VT1 і VT2 існує повний опір, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна складова носить ємнісний характер. Підключення активної індуктивності до колектора транзистора VT1 створює коливальний контур, втрати енергії в якому компенсуються від'ємним диференціальним опором. На сенсор Холла діє магнітне поле, що приводить до зміни як еквівалентної ємності коливального контуру, так і від'ємного диференціального опору на виході пристрою, що викликає зміну резонансної частоти автогенератора. Втрати енергії в коливальному контурі компенсуються за рахунок від'ємного опору [9-11]. Таким чином, резонансна частота коливального контуру залежить від дії магнітної індукції на сенсор Холла.

Вольт-амперна характеристика на вихідних клеммах, яка розраховується на основі еквівалентної схеми перетворювача, має спадну ділянку, що відповідає від'ємному диференційному опору. На рис. 8 представлено сімейство ВАХ частотного перетворювача в статичному режимі, а на рис. 9 – сімейство ВАХ в динамічному режимі.

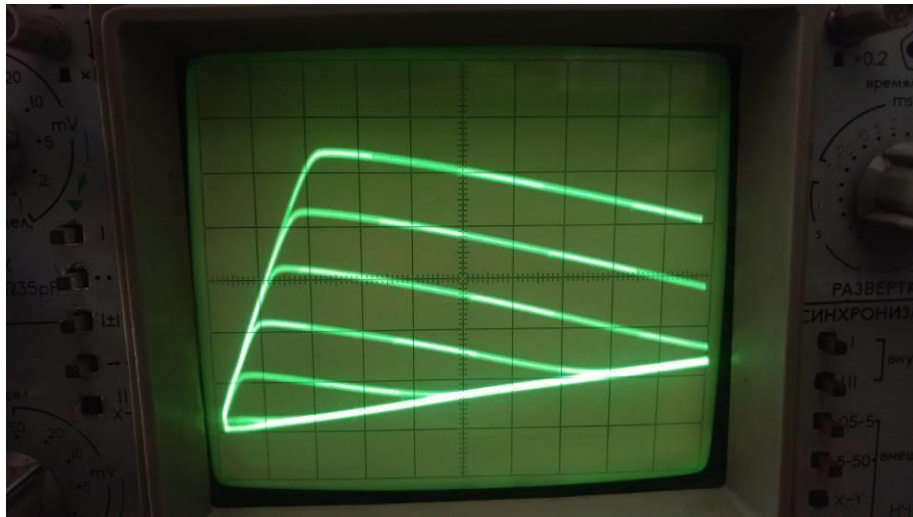


Рис.8. Сімейство ВАХ частотного перетворювача в статичному режимі

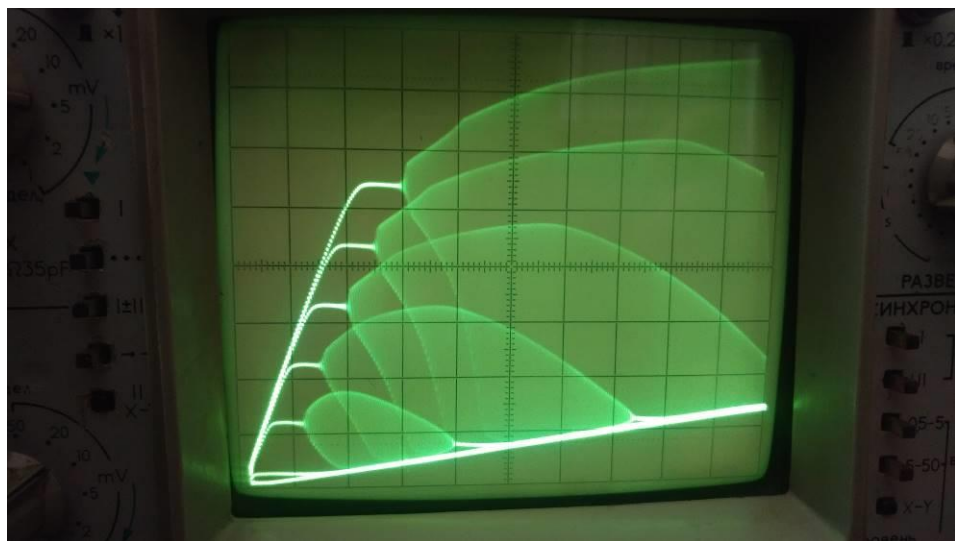


Рис.9. Сімейство ВАХ частотного перетворювача в динамічному режимі

Згідно з методом стійкості Ляпунова, виходячи з еквівалентної схеми частотного перетворювача магнітного поля з сенсором Холла, визначено функцію перетворення, яка є залежністю частоти генерації від зміни магнітної індукції. Аналітична залежність функції перетворення має вигляд :

$$F_0 = \left(\sqrt{\frac{R_g^2(B)C(B)}{L} - 1} \right) / (2\pi |R_g(B)|C(B)), \quad (1)$$

де $R_g(B)$ – активна складова повного опору на електродах колектор біполярного транзистора VT1 і емітер транзистора VT2, яка має від’ємне значення; $C(B)$ – ємність коливального контуру, яка визначається ємнісною складовою повного опору на електродах колектор-емітер транзисторів VT1 і VT2; L – еквівалентна індуктивність активного індуктивного елемента на основі біполярного транзистора VT4 та фазо зсувного ланцюга C2R6.

Чутливість частотного перетворювача магнітного поля визначається з виразу (1) і описується формулою (2):

$$S_B^{F_0} = \frac{dF_0}{dB} = -\frac{1}{2} \frac{\sqrt{\frac{R_g^2(B)C(B)}{L}} - 1 \left(\frac{\partial R_g(B)}{\partial B} \right)}{\pi R_g^2(B)C(B)} - \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\frac{R_g^2(B)C(B)}{L}} - 1 \left(\frac{\partial C(B)}{\partial B} \right)}{\pi R_g(B)C^2(B)} +$$

$$+ \frac{\frac{1}{4} \left(2 R_g(B)C(B) \left(\frac{\partial R_g(B)}{\partial B} \right) / L + R_g^2(B) \left(\frac{\partial C(B)}{\partial B} \right) / L \right)}{\pi R_g(B)C(B) \sqrt{\frac{R_g^2(B)C(B)}{L}} - 1} . \quad (2)$$

Теоретичні та експериментальні дані залежності частоти генерації від зміни магнітної індукції подано на рис. 10

Як видно з графіку частота генерації найбільше зростає в діапазоні від 10^{-3} Т до 0,06 Т, та при напрузі живлення 5,0 В змінюється від 435,000 МГц до 435,71 МГц, а у всьому діапазоні зміни індукції магнітного поля змінюється від 435,000 МГц до 436,075 МГц. Чутливість розробленого частотного перетворювача магнітного поля складає від 3,5 кГц/мТ до 5,5 кГц/мТ.

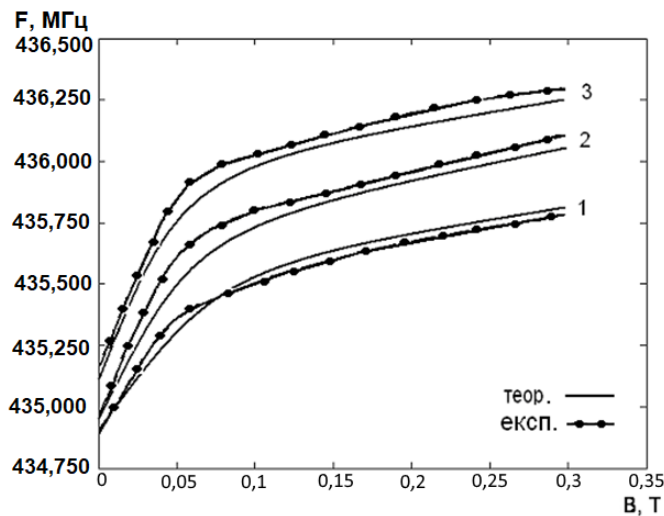


Рис.10. Залежність частоти генерації частотного перетворювача від величини магнітної індукції, при напругах живлення: 1-5,0 В, 2-5,5 В, 3- 6,0 В

На рис. 11 та рис.12 представлені скріншоти з програми **SDRSharp** з приймачем на основі **HackRF** [12]. Частота дискретизації (ширина смуги приймача) вибрана на рівні 2,5 МГц. Чим більше значення, тим ширше ми будемо бачити смугу на аналізаторі спектра. Вибір ширини смуги пропускання ґрунтується, як правило, на продуктивності комп'ютера. Чим ширша смуга пропускання, тим більше ресурсів необхідно задіяти для програми. Наприклад, ширина пропускання на комп'ютері з процесором Core i5 і оперативною пам'яттю в 16 гігабайт складає 2.5 MSPS. Як видно з рис.11, ширина спектру передачі частотного перетворювача магнітного поля без зміни індукції магнітного поля складає 10 кГц на 48 вибраному каналі (434,250 МГц) при напрузі живлення 4,5 В. На рис.12 представлено спектр частотного перетворювача магнітного поля на частоті 435,250 МГц (вище 70 каналу) і напрузі живлення 5,0 В видно, що при зміні індукції магнітного поля від 0 до 0,35 Т ширина спектру передачі збільшується до 1075 кГц і займає по ширині 45 каналів. Даний частотний метод модуляції дозволяє збільшити завадостійкість в 4,5 рази та збільшити дальність передачі при мінімальній потужності передачі.

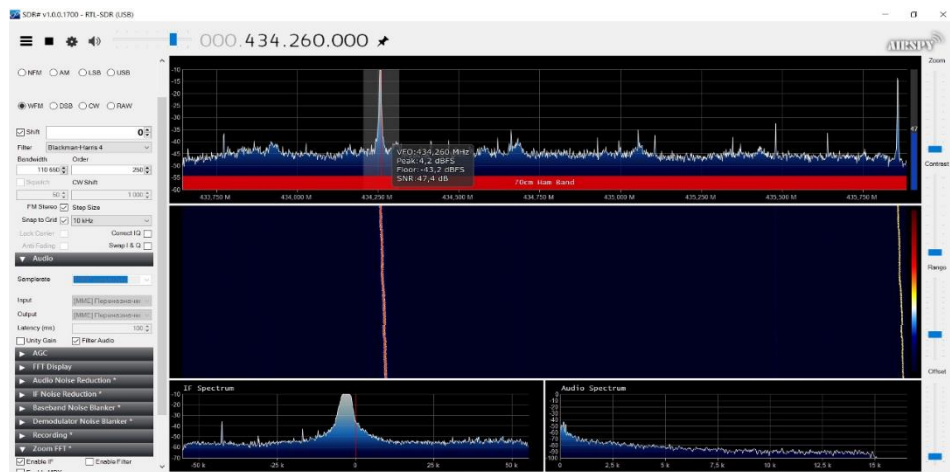


Рис. 11. Спектр передачі частотного перетворювача магнітного поля без зміни індукції магнітного поля

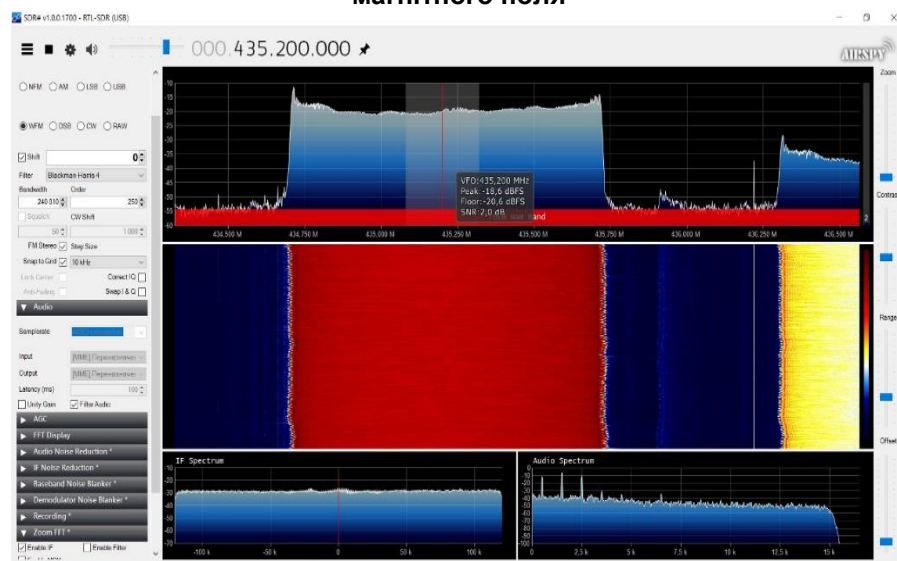


Рис. 12. Спектр передачі частотного перетворювача магнітного поля при зміні індукції магнітного поля від 0 до 0,35 Т

Висновки

1. Розроблено новий магніточутливий елемент на основі синтезованого напівпровідникового матеріалу. Проведені дослідження електропровідних властивостей тетракіс- μ_3 -(метоксо)(метанол) пентакіс(ацетилацетонато)- (трикупрум(II), ітрій(III)) метанолу (I) в спресованому вигляді в інтервалі температур 273 – 493 К показали, що при підвищенні температури його питомий опір різко зменшується від $7,72 \cdot 10^{13}$ Ом·м до $1,53$ Ом·м, що є типовим для напівпровідникових матеріалів. Опір β -дикетоната зменшується від $6,17 \cdot 10^{17}$ Ом при 273 К до $12,28 \cdot 10^3$ Ом при 493 К. При напрузі живлення 10 В та при температурі 273 К величина струму становить $1,6 \cdot 10^{-17}$ А, а при 493 К – $8,1 \cdot 10^{-4}$ А. Рухливість носіїв заряду становить $4,7 \cdot 10^{-8}$ м²/(В·с). Напряга Холла в діапазоні від 1 до 200 мТ напряга Холла зростає від $1,16 \cdot 10^{-5}$ В до $2,31 \cdot 10^{-4}$ В, а від 400 мТ до 1000 мТ – зміна Холлівської напруги носить лінійний характер і змінюється від $4,62 \cdot 10^{-4}$ до $1,16 \cdot 10^{-3}$ В.

2. На основі розробленого сенсора Холла запропоновано схемотехнічне рішення частотного перетворювача магнітного поля. Частотний перетворювач магнітного поля представляє собою гібридну інтегральну схему, що складається з чотирьох біполярних транзисторів з однаковими типами провідності, що створює передумови створення автогенераторного пристрою, у ланцюг зворотного позитивного зв'язку якого включений сенсор Холла, створений на основі тетракіс- μ_3 -(метоксо)(метанол)-пентакіс(ацетилацетонато)(трикупрум(II), ітрій(III)) метанол (I). Частота генерації розробленого перетворювача найбільше зростає в діапазоні від 10^{-3} Т до 0,06 Т, та при напрузі живлення 5,0 В змінюється від 435,000 МГц до 435,71 МГц, а у всьому діапазоні

зміни індукції магнітного поля змінюється від 435,000 МГц до 436,075 МГц. Чутливість розробленого частотного перетворювача магнітного поля складає від 3,5 кГц/мТ до 5,5 кГц/мТ.

Література

1. Спицын, В. И., . Мартыненко Л. И. Теоретическая и прикладная химия β-дикетонатов металлов : М.: Наука, 1985. 270 с.
2. Спицын, В. И. Проблемы химии и применения β-дикетонатов металлов : М.: Наука, 1982. 264 с.
3. Спицын, В. И. Строение, свойства и применение β-дикетонатов металлов : М.: Наука, 1978. 264 с.
4. Пат. 7408 Україна, МКІ Н 01 L 29/82. Мікроелектронний сенсор магнітної індукції : Осадчук В.С., Осадчук О.В., Мартинюк В.В. (УКРАЇНА). - №20041510196; Заявлено 13.12.2004; Опубл. 15.06.2005, Бюл. №6. 4 с. : іл.
5. Пат. 7409 Україна, МКІ Н 01 L 29/82. Частотний магнітний сенсор : Осадчук В.С., Осадчук О.В., Мартинюк В.В. (Україна). №20041510197; Заявлено 13.12.2004; Опубл. 15.06.2005, Бюл. №6. 4 с. : іл.
6. Самусь, Н.М., Гандзий М. В., Цапков В. И. Гетероядерные μ-метоксо(медь, иттрий или лантаноид) ацетилацетонаты : Журнал общей химии. 1992. Т. 62, В. 3. С. 510-515.
7. Осадчук, О.В., Мартинюк В.В., Євсєєва М.В., Селецька О.О. Магніточутливий сенсор на основі гетерометалевої комплексної сполуки : Вісник Хмельницького національного університету. 2019 №3. С. 97101.
8. Осадчук, О.В., Мартинюк В. В., Євсєєва М. В., Селецька О. О. Дослідження впливу температури на фізичні параметри напівпровідника μ-метоксо(купрум(II), бісмут(III)) ацетилацетонату : Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2019 №4 (145). С.80-86.
9. Осадчук, В. С., Осадчук А.В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем : Винница: «Универсум-Винница», 1999. 275 с.
10. Osadchuk, A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors : et al Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2019; 111761I (2019).
11. Osadchuk, A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Optical transducers with frequency output : et al Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 2017, 104451X (2017).
12. URL:<https://airspy.com/download/>

References

1. Spicyn, V. I., . Martynenko L. I. Teoreticheskaya i prikladnaya himiya b-diketonatov metallov : M.: Nauka, 1985. 270 s.
2. Spicyn, V. I. Problemy himii i primeneniya b-diketonatov metallov : M.: Nauka, 1982. 264 s.
3. Spicyn, V. I. Stroenie, svojstva i primeneniye b-diketonatov metallov : M.: Nauka, 1978. 264 s.
4. Pat. 7408 Ukrayina, MKI N 01 L 29/82. Mikroelektronnij sensor magnitnoyi indukciyi : Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Martinyuk V.V. (UKRAYiNA). - №20041510196; Zayavleno 13.12.2004; Opubl. 15.06.2005, Byul. №6. 4 s. : il.
5. Pat. 7409 Ukrayina, MKI N 01 L 29/82. Chastotnij magnitnij sensor : Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Martinyuk V.V. (Ukrayina). №20041510197; Zayavleno 13.12.2004; Opubl. 15.06.2005, Byul. №6. 4 s. : il.
6. Samus, N.M., Gandzij M. V., Capkov V. I. Geteroyadernye μ-metokso(med, ittrij ili lantanoid) acetilacetonyaty : Zhurnal obshej himii. 1992. T. 62, V. 3. S. 510-515.
7. Osadchuk, O.V., Martinyuk V.V., Yevsyeyeva M.V., Selecka O.O. Magnitochutlivij sensor na osnovi geterometalevoyi kompleksnoyi spoluki : Visnik Hmelnickogo nacionalnogo universitetu. 2019 №3. S. 97101.
8. Osadchuk, O.V., Martinyuk V. V., Yevsyeyeva M. V., Selecka O. O. Doslidzhennya vplivu temperaturi na fizichni parametri napivprovodnika μ-metokso(kuprum(II), bismut(III)) acetilacetonyatu : Visnik Vinnickogo politehnichnogo institutu. 2019 №4 (145). S.80-86.
9. Osadchuk, V. S., Osadchuk A.V. Reaktivnye svojstva tranzistorov i tranzistornyh shem : Vinnica: «Universum-Vinnica», 1999. 275 s.