

УДК 681.586.37

DOI: 10.31653/2306-5761.33.2022.79-86

ELECTRONIC THERMOSENSORS FOR UNMANNED SHIPS**ЕЛЕКТРОННІ ТЕРМОЧУТЛИВІ СЕНСОРИ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СУДЕН****S.A. Mikhailov, DSc, professor, I.M. Vikulin, DSc, professor, N.S. Mikhailov, PhD student****С.А. Михайлов, д.т.н., професор, І.М. Вікулін, д.ф.-м.н., професор, Н.С. Михайлов, аспірант***National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine**Національний університет «Одеська морська академія», Україна***ABSTRACT**

The article deals with temperature sensors, the operation of which is based on the use of a change of voltage on a p-n junction of the semiconductor transistor at the set direct current. It sets out the theoretical justification for requirements for the structure of diodes and transistors used as temperature sensors. It is shown that for the improvement of thermometric parameters of sensors it is necessary to use transistors made of high-resistivity silicon with a thin base and small concentration of basic admixture.

The task of creating fully electronic automatic measuring devices for control of the environment and mechanisms temperature is especially relevant for autonomous ships without a crew. The feature of the implementation of such a task is that initial signals of measuring devices must be only electric, electronic, and consistent with the systems of transmission of the coastal centres that manage autonomous ships.

Electronic temperature sensors will become an obligatory part of future autonomous ships without a crew. They will be able not only to replace classic temperature measuring devices but also will allow, in real-time, to operatively inform the operators of coastal ship management centres of the current situation allowing taking necessary decisions about providing safety of navigation.

Keywords: automatic ships, electronics data transmit, electronics thermosensors, safety of navigation, navigation, unmanned ships.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Контроль стану температурної обставини на морських судах завжди був актуальним завданням як з метою забезпечення безпеки для вантажу і судноплавства в цілому, живучості самого судна, так і в сенсі охорони життя та здоров'я членів екіпажу. Тим часом у зв'язку з розробкою та створенням повністю автономних автоматизованих суден без людей на борту це завдання стає ще більш актуальним. Особливість реалізації сенсорів температурної обставини для автономних судів полягає у тому, що вихідна інформація має бути представлена не у візуальній формі – як у вигляді показань стрілочних приладів, а повністю в електронному форматі, бажано цифровому, та її передачі, у режимі реального часу, на береговий центр - оператору, що контролює поточну обставину та управляє цим судном [1].

З цієї причини пристрої, що здійснюють контроль температурної обставини на морських судах, мають реновувати та модернізувати, починаючи від первинних датчиків і схем вимірювання, до перетворювачів інформації та каналів передачі даних.

Пропоновані та обговорювані в даній статті пристрої реалізують запатентовані авторами нові принципи та схеми вимірювань для різних типів температурної обставини: приміщень, механізмів, доквілля. Сигнали в цих пристроях є виключно та повністю електронними. Таке обладнання є затребуваним та актуальним для повністю автоматизованих автономних суден

без екіпажів. Ці схеми вимірювання та пристрої не мають рухомих механічних частин та механізмів, їх вихідні сигнали є повністю електронними, з можливістю цифрового кодування.

Аналіз останніх досягнень і публікацій, у яких розпочато вирішення цієї проблеми та виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

В цей час у сфері морських інформаційних технологій (ІТ) відбуваються зміни, які пов'язані з появою нових безпілотних суден, з посиленням конкуренції серед провайдерів зв'язку, застосуванням нових телекомунікаційних технологій як каналами зв'язку судно-берег-судно, так і всередині судна. Найбільш перспективними напрямками застосування ІТ у цій сфері вважаються Е-навігація та безекіпажне судноводство. Відомий проект Maritime Unmanned Navigation через Intelligence in Networks (MUNIN), який координується Центром морської логістики Фраунгофера [2]. У рамках MUNIN консорціум наукових та індустріальних організацій розробив концепцію безекіпажного судна, керованого бортовою електронікою під контролем берегового центру. Було запропоновано технічні рішення для автономного містка та машинного відділення, берегового центру та комунікації судна з ним [2, 3].

Для автономних суден без екіпажу особлива та відповідальна роль покладається на сенсори та датчики безекіпажного судна. Призначення сенсорів, наприклад для безпечного судноводіння, це виявлення об'єктів, що плавають на поверхні води, які становлять небезпеку для руху, і передача відповідної інформації в центр управління. У разі повністю автономного судна алгоритми системи управління повинні приймати рішення про спосіб безпечної розбіжності з такими об'єктами на підставі прогнозу їхньої поведінки. Аналогічні системи потрібні для виявлення та аналізу світлових та звукових сигналів, що подаються іншими учасниками руху, а також маячних вогнів, навігаційних знаків та буїв. Зрозуміло, що такі системи принесуть користь і для традиційного судноводіння з екіпажем на борту судна.

Окреме самостійне та важливе завдання – це моніторинг стану механізмів та вузлів автономного або малоекіпажного судна, що здійснюється за допомогою датчиків, які визначають не лише стандартні технічні параметри обладнання, але й непрямі, наприклад, звуки та вібрацію (на звичайному судні ця додаткова інформація може стати важливою обставиною до ухвалення управлінського рішення досвідченим судовим інженером) [4]. Отримані дані повинні передаватися до берегового центру управління, а також бути вхідними даними для системи управління автономним судном. Для автономних судів актуальні технології моніторингу приміщень щодо наявності води, диму, позаштатної зміни температури, вологості та температурою обставини.

Формулювання цілей статті (постановка задачі)

Метою цієї статті є розробка принципово нових електронних сенсорів-датчиків температури, принцип роботи яких заснований на використанні зміни напруги на прямо зміщеному $p-n$ переході при заданому прямому струмі. Сформулювати та теоретично обґрунтувати вимоги, які пред'являються до структури діодів та транзисторів, що застосовуються як сенсори-датчики температури. Показати, що для покращення термометричних параметрів датчиків необхідно використовувати транзистори з високоомного кремнію з тонкою базою та малою концентрацією в ній основної домішки.

Виклад матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Останнім часом широко застосовуються напівпровідникові прилади такі як термочутливі елементи, у тому числі транзистори та діоди.

Розглянемо вимоги до структури діодів і біполярних транзисторів, які можуть використовуватись як термочутливі елементи сенсорів-датчиків температури.

Вольт-амперна характеристика $p-n$ - переходу може бути записана у вигляді:

$$I = I_{нас} \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

де $I_{нас}$ - струм насичення $p-n$ - переходу при зворотній напрузі;

q - заряд електронів;

U - напруга, прикладена до $p-n$ - переходу;

k - постійна Больцмана;

T - абсолютна температура $p-n$ - переходу, °К.

При використанні транзистора, як високостабільного датчика температури, його $p-n$ - перехід включається в пряму напругу, тому що при зворотному включенні проявляються струми витоку по поверхні $p-n$ - переходу, які нестабільні в часі. Струм $I_{нас}$ залежить від товщини W бази $p-n$ - переходу. Якщо товщина бази $p-n$ - переходу більше дифузійної довжини дірок n - області ($W \gg L_p$), то

$$I_{нас} = q \cdot s \frac{D_p \cdot P_n}{L_p} \quad (2)$$

де s – площа перетину $p-n$ – переходу;

D_p - коефіцієнт дифузії;

P_n - концентрація дірок в n - області.

Якщо $W \gg L_p$ та швидкість рекомбінації носіїв на омичеськом контакті бази велика, то

$$I_{нас} = q \cdot s \frac{D_p \cdot P_n}{W} \quad (3)$$

Так як $L_p^2 = D_p \tau_p$ (τ_p - час життя інжекттованих в базу носіїв), то в $p-n$ - переході з товстою базою величина струму залежить від часу життя носіїв, яке визначається рекомбінацією заряду на поверхні і не є стабільним. Отже, як датчик температури необхідно використовувати $p-n$ - перехід з тонкою базою.

Температурні залежності величин, що входять у вираз (3), визначаються за формулами

$$P_n = \frac{AT^3}{N} \exp\left(-\frac{E_q}{kT}\right) \quad (4)$$

$$D_p = \mu_p \frac{kT}{q} \quad (5)$$

де A – постійна;

N - концентрація легуючої домішки в базі;

E_q - ширина забороненої зони;

μ_p - рухливість інжекттованих носіїв.

Якщо до $p-n$ - переходу прикладена пряма напруга, то експонента у формулі (1) значно більше одиниці. Тоді, використовуючи вирази (3) – (5), формулу (1) запишемо у вигляді

$$I = \frac{BT^4 \mu_p}{NW} \exp\left(\frac{qU - E_g}{kT}\right) . \quad (6)$$

Рухливість інжекттованих носіїв залежить від температури в діапазоні зміни від мінус 50 до плюс 100 °С

$$\mu_{p,n} \sim \frac{1}{T^\alpha} . \quad (7)$$

Тут величина α визначається типом матеріалу та ступенем його легування.

Підставивши (7) у вираз (6), отримаємо;

$$I = \frac{CT^{4-\alpha}}{NW} \exp\left(\frac{qU - Eq}{kT}\right) , \quad (8)$$

де постійна C включає всі постійні з формул (4) – (7).
Згідно з виразом (8)

$$U = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{INW}{CT^{4-\alpha}}\right) + \frac{Eq}{q} . \quad (9)$$

Ідеальна лінійна залежність $U(T)$ може бути отримана лише при $\alpha = 4$ (зазвичай $\alpha < 4$) та живленні $p-n$ - переходу від генератора струму.

У кремнії рухливість електронів більшою мірою залежить від температури, ніж рухливість дірок. Отже, як матеріал бази необхідно використовувати матеріал p - типу тобто. $p-n^+$ - перехід, у якому інжекція електронів відбувається у основу p - типу. Відомо, що у високоомному кремнії p - типу, $\alpha = 2,7$, тоді

$$4 - \alpha = 1,3 .$$

Остання величина і визначає нелінійність температурної характеристики $U(T)$.

У реальному випадку отримати $p-n$ перехід діода з тонкою базою і великою швидкістю рекомбінації носіїв на базовому контакті важко. Тому як термочутливий елемент використовується емітерний $p-n$ - перехід транзистора з тонкою базою, в якому при включенні колекторного $p-n$ - переходу у зворотному напрямку концентрація інжекттованих носіїв в кінці бази дорівнює нулю (аналог високої швидкості рекомбінації). Умова включення колекторного $p-n$ - переходу зберігається і при замкнутих колекторах та базі, які можуть використовуватися як один загальний вивід датчика; як інший використовується емітер. Інакше висловлюючись, транзистор у данному разі використовується як двополюсник.

Зазвичай (з метою зменшення енергоспоживання) датчик-сенсор працює за малих струмів, $I < CT^{4-\alpha} / NW$, тобто вираз під логарифмом у формулі (9) менше одиниці і він негативний, отже, $\Delta U / \Delta T < 0$. Зростання множника NW у данному разі призводить до збільшення U (модуль логарифму зменшується) і зменшення термочутливості $\Delta U / \Delta T$. Таким чином, як термочутливий елемент датчика температури слід використовувати $p-n$ - перехід, сформований у високоомному матеріалі.

Для досліджень були обрані кремнієві $n-p-n$ - транзистори, виготовлені на основі кремнію n - типу з питомим опірм $40 \text{ м} \cdot \text{см}$

В експериментальних зразках глибина залягання колекторного переходу становила ($3,5 \pm 0,2$) мкм, глибина залягання емітерного переходу варіювалася в межах від 1,0 до 2,5 мкм, що відповідає товщині бази 1,0...2,5 мкм. Концентрація основної домішки основою становила $10^{18} \dots 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ в емітері – $(4 \dots 5) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Інші конструкторсько-технологічні параметри відповідали типовим значенням для малопотужних планарних епітаксійних транзисторів.

Пряме падіння напруги знімалося при робочому струмі 100 мкА в діапазоні зміни температури мінус 60 до плюс 125 °С.

На малюнку наведено залежність прямого падіння напруги на $p-n$ -переході та термочутливості датчика температури від концентрації основних носіїв у базі та від товщини бази.

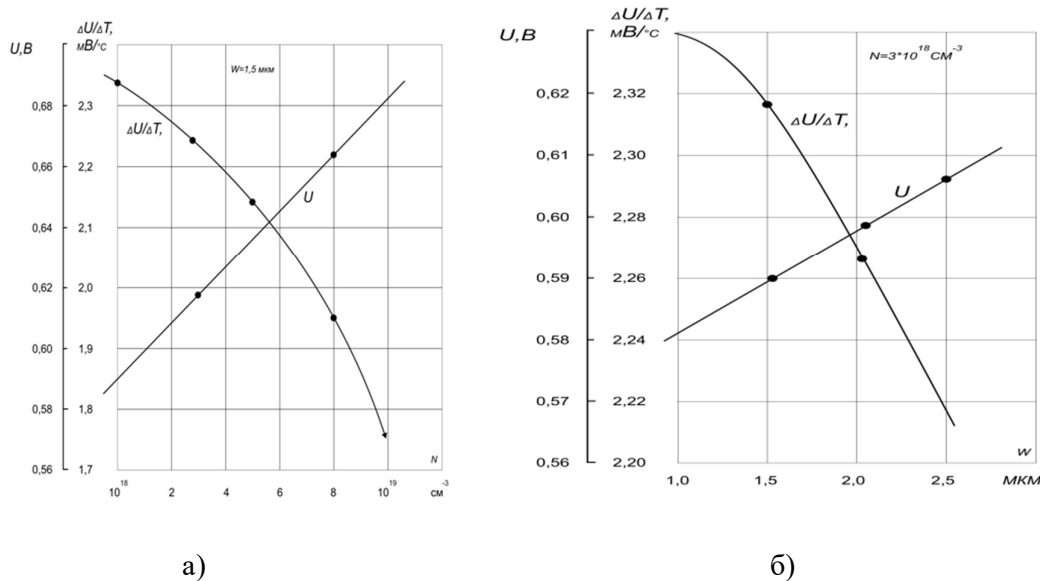


Рис. 1. Залежність прямого падіння напруги на $p-n$ -переході та термочутливості датчика температури від концентрації основних носіїв у базі (а) та від товщини бази (б)

Висновки та перспектива подальшої роботи за цим напрямком

Таким чином, датчики температури на основі біполярних транзисторів повинні мати високоомний колектор, тонку базу і малу концентрацію основної домішки в базі, через те, що величина a зростає зі зменшенням концентрації носіїв у базі, а отже, залежність $U(T)$ наближається до лінійної та термочутливість $\Delta U / \Delta T$ зростає.

Варіюючи конструктивними параметрами термочутливого елемента, можна отримати необхідні значення термочутливих параметрів, що дозволяє поліпшити їх відтворюваність і забезпечити взаємозамінність сенсорів-датчиків температури.

Завдання створення повністю електронних автоматичних вимірювальних пристроїв для сенсорів температурою обставини є особливо актуальним для автономних суден без екіпажу. Особливістю реалізації такого завдання є те, що вихідні сигнали вимірювальних пристроїв повинні бути виключно електричними, електронними, сумісними із системами передачі даних берегових центрів управління [9-17].

Цілком очевидно, що електронні сенсори температурою обставини стануть обов'язковим атрибутом майбутніх автономних суден без екіпажу. Вони зможуть не лише замінити класичні газоаналізатори, а й дозволять, у режимі реального часу, оперативно інформувати операторів берегових центрів управління судами про поточну обставину для ухвалення потрібних рішень щодо безпеки судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Викулин И.М. Электронный компас для автономных судов без экипажа. / И.М. Викулин Н.С. Михайлов, С.А. Михайлов // Судноводіння: Зб. наук. праць. / НУ «ОМА», Вип. 30. с. 43-51. – Одеса: «ВидавІнформ», 2020. DOI: <https://doi.org/10.31653/2306-5761.29.2020.43-51>
2. Burmeister H. C. Autonomous unmanned merchant vessel and its contribution towards the e-Navigation implementation: The MUNIN perspective/ H. C. Burmeister, W. Bruhn, Ø. J. Rødseth, T. Porathe // International Journal of e-Navigation and Maritime Economy. — 2014. — Vol. 1. — pp. 1–13. DOI: 10.1016/j. enavi.
3. Jokioinen E. Remote and Autonomous Ships — The next steps / E. Jokioinen, J.Poikonen, M. Hyvönen, A. Kolu, [etc.]. — London: AAWA Position Paper, Rolls-Royce, 2016. — 88 p.
4. Vikulin I.M. Combined semiconductor injection magnetic field sensors for wireless information networks. / I.M. Vikulin, L.F.Vikulina, V.E.Gorbachev, N.S.Mikhailov // Radioelectronics and Communication Systems, 2020, Vol. 63, № 7, pp. 368-375. – Allerton Press. – N.-Y. – 2020.
5. Park B.; Nah J.; Choi J.; Yoon I. “ Robust Wireless Sensor and Actuator Networks for Networked Control Systems,” Sensors (Basel), Vol. 19, No. 7:1535, p. 1–28, 2019. DOI: 10.3390/s19071535.
6. Chen Z.; Deng F.; Fu Z.; Wu X. “Design of an Ultra-low Power Wireless Temperature Sensor Based on Backscattering Mechanism,” Sensing and Imaging An International Journal, Vol. 19, No. 1, pp. 19–24, 2018. DOI: 10.1007/s11220-018-0207-x.
7. Luong V. S.; Lu C.C.; Yang J.W.; Jeng J.T. “A novel CMOS transducer for giant magnetoresistance sensors” Review of Scientific Instruments, Vol. 88, No. 2:025004, 2017 DOI: 10.1063/1.4976025.
8. Luong V. S.; Tuan N.A.; Tue N.A. “Exchange Biased Spin Valve-Based Gating Flux Sensor,” Measurement Vol. 115, p. 173–177, 2018. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.10.038.
9. Li Z.R.; Mi W.B.; Bai H.L. “The contribution of distinct response characteristics of Fe atoms to switching of magnetic anisotropy in Fe₄N/MgO heterostructures,” Applied Physics Letters, Vol. 113, No. 13:132401, 2018. DOI: 10.1063/1.5048317.
10. Jibiki Y.; Goto M.; Tsujikawa M.; et al. “Interface resonance in Fe/Pt/MgO multilayer structure with large voltage controlled magnetic anisotropy change,” Applied Physics Letters, Vol. 114, No. 8:082405, 2019. DOI: 10.1063/1.5082254.
11. Bichurin M.I.; Petrov V.M.; Petrov R.V.; Tatarenko A.S. “Magnetolectric Magnetometers,” in: Grosz A., Haji-Sheikh M., Mukhopadhyay S. (eds) High Sensitivity Magnetometers. Smart Sensors, Measurement and Instrumentation, Vol 19. Cham: Springer, 2017. pp 127–166. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-34070-8>.
12. Ding J.; Huang L.; Luo G.; et al. “A resonant microcantilever sensor for in-plane multi-axis magnetic field measurements,” Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 29, No. 6:065010, 2019. DOI: 10.1088/1361-6439/ab18ed.
13. Ichkitidze L.; Selishchev S.; Telyshev D. “Combined Magnetic Field Sensor with Nanostructured Elements,” Journal of Physics Conference Series, Vol. 1182:012015, p. 1–9, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1182/1/012015.
14. Luong V. S.; Tuan N. A.; Tue N. A.; et al. “Application of the flux bending effect in an active flux-guide for low-noise planar vector tmr magnetic sensors,” Vietnam Journal of Science and Technology, Vol. 56, No. 6, p. 714–722, 2018. DOI: 10.15625/2525-2518/56/6/12652.

15. Zhang Y.; Hao Q.; Xiao G. “Low-Frequency Noise of Magnetic Sensors Based on the Anomalous Hall Effect in Fe-Pt Alloys,” *Sensors*, Vol. 19, No. 16:3537, p. 1–6, 2019. DOI: 10.3390/s19163537.
16. Singh R.; Luo Z.; Lu Z.; et al. “Thermal stability of NDR-assisted anomalous Hall effect based magnetic device,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 125, No. 20:203901, 2019. DOI: 10.1063/1.5088916.
17. Luong V.S.; Tuan N.A.; Hoang Q.K. “Resolution Enhancement in Measuring Low-frequency Magnetic Field of Tunnel Magnetoresistance Sensors with AC-Bias Polarity Technique,” *Measurement*, Vol. 127, p. 512–517, 2018. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.06.027.

REFERENCES

1. Vykulyn Y.M. Електронний компас для автономних судов без екипажа. / Y.M. Vykulyn N.S. Mykhailov, S.A. Mykhailov // *Sudnovodinnia: Zb. nauk. prats. / NU «OMA», Vyp. 30. s. 43-51. – Odesa: «VydavInform», 2020. DOI: <https://doi.org/10.31653/2306-5761.29.2020.43-51>*
2. Burmeister H. C. Autonomous unmanned merchant vessel and its contribution towards the e-Navigation implementation: The MUNIN perspective/ H. C. Burmeister, W. Bruhn, Ø. J. Rødseth, T. Porathe // *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*. — 2014. — Vol. 1. — pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.enavi.
3. Jokioinen E. Remote and Autonomous Ships — The next steps / E. Jokioinen, J. Poikonen, M. Hyvönen, A. Kolu, [etc.]. — London: AAWA Position Paper, Rolls-Royce, 2016. — 88 p.
4. Vikulin I.M. Combined semiconductor injection magnetic field sensors for wireless information networks. / I.M. Vikulin, L.F. Vikulina, V.E. Gorbachev, N.S. Mikhailov // *Radioelectronics and Communication Systems*, 2020, Vol. 63, № 7, pp. 368-375. — Allerton Press. — N.-Y. — 2020.
5. Park B.; Nah J.; Choi J.; Yoon I. “Robust Wireless Sensor and Actuator Networks for Networked Control Systems,” *Sensors (Basel)*, Vol. 19, No. 7:1535, p. 1–28, 2019. DOI: 10.3390/s19071535.
6. Chen Z.; Deng F.; Fu Z.; Wu X. “Design of an Ultra-low Power Wireless Temperature Sensor Based on Backscattering Mechanism,” *Sensing and Imaging An International Journal*, Vol. 19, No. 1, pp. 19–24, 2018. DOI: 10.1007/s11220-018-0207-x.
7. Luong V. S.; Lu C.C.; Yang J.W.; Jeng J.T. “A novel CMOS transducer for giant magnetoresistance sensors” *Review of Scientific Instruments*, Vol. 88, No. 2:025004, 2017 DOI: 10.1063/1.4976025.
8. Luong V. S.; Tuan N.A.; Tue N.A. “Exchange Biased Spin Valve-Based Gating Flux Sensor,” *Measurement* Vol. 115, p. 173–177, 2018. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.10.038.
9. Li Z.R.; Mi W.B.; Bai H.L. “The contribution of distinct response characteristics of Fe atoms to switching of magnetic anisotropy in Fe₄N/MgO heterostructures,” *Applied Physics Letters*, Vol. 113, No. 13:132401, 2018. DOI: 10.1063/1.5048317.
10. Jibiki Y.; Goto M.; Tsujikawa M.; et al. “Interface resonance in Fe/Pt/MgO multilayer structure with large voltage controlled magnetic anisotropy change,” *Applied Physics Letters*, Vol. 114, No. 8:082405, 2019. DOI: 10.1063/1.5082254.
11. Bichurin M.I.; Petrov V.M.; Petrov R.V.; Tatarenko A.S. “Magnetoelectric Magnetometers,” in: Grosz A., Haji-Sheikh M., Mukhopadhyay S. (eds) *High Sensitivity*

- Magnetometers. *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation*, Vol 19. Cham: Springer, 2017. pp 127–166. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-34070-8>.
12. Ding J.; Huang L.; Luo G.; et al. “A resonant microcantilever sensor for in-plane multi-axis magnetic field measurements,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 29, No. 6:065010, 2019. DOI: 10.1088/1361-6439/ab18ed.
 13. Ichkitidze L.; Selishchev S.; Telyshev D. “Combined Magnetic Field Sensor with Nanostructured Elements,” *Journal of Physics Conference Series*, Vol. 1182:012015, p. 1–9, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1182/1/012015.
 14. Luong V. S.; Tuan N. A.; Tue N. A.; et al. “Application of the flux bending effect in an active flux-guide for low-noise planar vector tmr magnetic sensors,” *Vietnam Journal of Science and Technology*, Vol. 56, No. 6, p. 714–722, 2018. DOI: 10.15625/2525-2518/56/6/12652.
 15. Zhang Y.; Hao Q.; Xiao G. “Low-Frequency Noise of Magnetic Sensors Based on the Anomalous Hall Effect in Fe-Pt Alloys,” *Sensors*, Vol. 19, No. 16:3537, p. 1–6, 2019. DOI: 10.3390/s19163537.
 16. Singh R.; Luo Z.; Lu Z.; et al. “Thermal stability of NDR-assisted anomalous Hall effect based magnetic device,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 125, No. 20:203901, 2019. DOI: 10.1063/1.5088916.
 17. Luong V.S.; Tuan N.A.; Hoang Q.K. “Resolution Enhancement in Measuring Low-frequency Magnetic Field of Tunnel Magnetoresistance Sensors with AC-Bias Polarity Technique,” *Measurement*, Vol. 127, p. 512–517, 2018. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.06.027.