

УДК 621.317.33

DOI: 10.31653/2306-5761.37.2025.123-136

ELECTRONIC SENSORS-TRANSDUCERS COMPLEX FOR AUTONOMOUS SHIPS

КОМПЛЕКС ЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ – ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СУДЕН

I.M. Vikulin¹, DSc, professor, **S.A. Mikhailov¹**, DSc, professor,
O.A. Nazarenko², PhD, associate professor, **L.F. Vikulina²**, DSc, professor
I.M. Вікулін¹, д.ф.-м.н., проф., **С.А. Михайлов¹**, д.т.н. проф.
О.А. Назаренко², к.ф.-м.н., доц., **Л.Ф. Вікуліна²**, д.т.н., проф.

¹National University «Odesa maritime academy», Ukraine

¹Національний університет «Одеська морська академія», Україна

²State University of Intellectual Technologies and Telecommunication, Ukraine

²Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Україна

ABSTRACT

Methods for increasing the sensitivity of sensors-transducers of external influences (temperature, radiation, pressure, etc.) based on a single-junction transistor (SJT) generator with a frequency output have been experimentally investigated. The sensor is a SJT generator with two current-sending resistors and a capacitor, where the only sensitive element is the SJT itself. The increase in sensitivity is achieved by replacing passive resistors and a capacitor with elements sensitive to the measured influence (diodes, transistors, etc.). Mutual change in the parameters of the generator circuit elements when measuring external influences allows to significantly increase the sensitivity of the sensors. In most variants of the circuits, industrial samples of such elements are used. The experimental results demonstrate that the sensitivity of the sensors can be significantly enhanced by using these methods. This approach provides a promising avenue for developing highly sensitive sensors for various applications, including environmental monitoring, medical diagnostics, and industrial process control. The findings of this study contribute to the advancement of sensor technology and open up new possibilities for improving the performance and reliability of sensors in different fields. Furthermore, the integration of sensitive elements such as diodes and transistors into the generator circuit not only improves sensitivity but also ensures stability and repeatability of measurements.

Keywords: ship automation, electronic data transmission, navigation safety, navigation, unmanned vessels, sensor, transducer, diode, transistor, resistor, temperature, magnetic field, radiation, characteristic, sensitivity, radiation.

АНОТАЦІЯ

Експериментально досліджено методи збільшення чутливості сенсорів-перетворювачів зовнішніх впливів (температура, радіація, тиск тощо) на основі генератора на одноперехідному транзисторі (ОПТ) з частотним виходом. Сенсором є генератор на ОПТ із двома токозадаючими резисторами і конденсатором, де чутливим елементом є лише сам ОПТ. Збільшення чутливості досягається заміною пасивних резисторів та конденсатора на чутливі до вимірюваного впливу елементи (діоди, транзистори тощо). Взаємна зміна параметрів елементів схеми генератора при вимірі зовнішнього впливу дозволяє значно збільшити чутливість сенсорів. У більшості варіантів схем використовуються промислові зразки таких

елементів. Експериментальні результати демонструють, що чутливість датчиків можна значно підвищити, використовуючи ці методи. Цей підхід відкриває перспективні можливості для розробки високочутливих датчиків для різних застосувань, включаючи моніторинг навколишнього середовища, медичну діагностику та контроль промислових процесів. Результати цього дослідження сприяють розвитку технології датчиків і відкривають нові можливості для покращення продуктивності та надійності датчиків у різних галузях. Важливо зазначити, що використання промислових зразків чутливих елементів дозволяє забезпечити стабільність та повторюваність результатів, що є критичним для наукових досліджень та практичного застосування. Таким чином, запропоновані методи можуть бути успішно інтегровані в існуючі системи сенсорів, що дозволить значно покращити їх ефективність та надійність. Це дослідження є важливим кроком у вдосконаленні сучасних технологій сенсорів і має потенціал для широкого застосування в різних галузях науки та техніки.

Ключові слова: автоматизація суден, електронна передача даних, безпека судноводіння, навігація, судна без екіпажу, сенсор, датчик, перетворювач, діод, транзистор, резистор, температура, магнітне поле, випромінювання, характеристика, чутливість, радіація.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями

В даний час у сфері морських інформаційних технологій (ІТ) відбуваються зміни, які пов'язані з появою нових безпілотних суден [1], з посиленням конкуренції серед провайдерів зв'язку, застосуванням нових телекомунікаційних технологій як у каналах зв'язку судно-берег-судно, так і всередині судна. Найбільш перспективними напрямками застосування ІТ у цій сфері вважаються Е-навігація та безекіпажне судноводіння. 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 [2]. 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) [3]. Отримані дані повинні передаватися до берегового центру управління, а також бути вхідними даними для системи управління автономним судном. Для автономних суден актуальні технології моніторингу приміщень щодо наявності води, диму, позаштатної зміни температури, вологості та температурою обставини, радіації та інші.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частини загальної проблеми

Сенсором-перетворювачем параметрів навколишнього середовища називається датчик-генератор змінного сигналу, що перетворює величину зовнішнього впливу (температура, випромінювання тощо) у вихідний змінний сигнал, амплітуда або частота якого залежать від

величини цього впливу. Найпростішим сенсором цього є генератор на одноперехідному транзисторі [4].

Стрижнева структура ОПТ (рис. 1) складається з напівпровідника з омичними контактами B_1 і B_2 на кінцях та емітерним p - n -переходом E між ними.

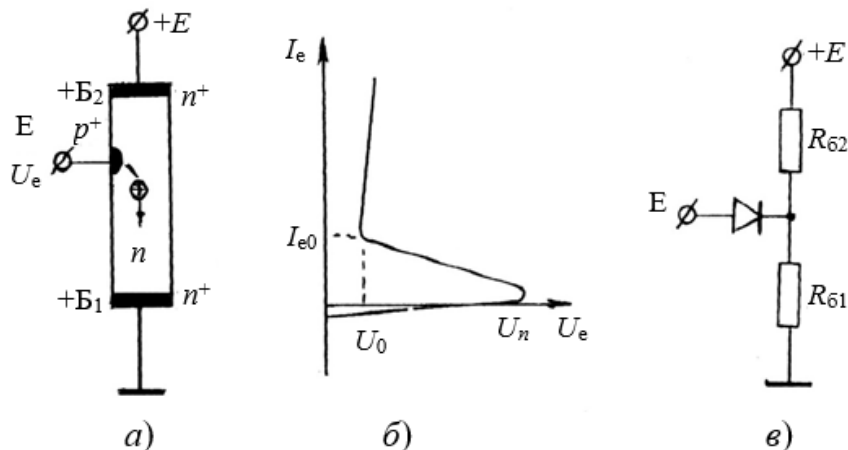


Рис. 1. а) структура ОПТ; б) вхідна ВАХ; в) еквівалентна схема

Вхідна вольт-амперна характеристика (ВАХ) ОПТ відноситься до S -типу, тобто має ділянку негативного диференціального опору. Зі зростанням U_e поки $U_e < U_{61}$ p - n -перехід включений у зворотному напрямку і через нього протікає малий зворотний струм. Як тільки U_e стає більше U_{61} p - n -перехід включається у прямому напрямку і починає інжектувати в базу дірки, що несуться електричним полем у бік контакту B_1 . Опір бази R_{61} і U_{61} зменшуються, а пряма напруга на p - n -переході та інжекція ще більше збільшуються. Такий процес, що самоприскорюється, призводить до лавинного заливання нижньої бази дірками, її опір і падіння напруги на ній зменшується до граничного $U_{61} = U_0$. Відповідно, напруга у якому включається p - n -перехід, називається напругою включення U_n , а U_0 – остаточною напругою [5–8].

Схема генератора на основі ОПТ показана на рис. 2. При включенні джерела живлення E конденсатор C починає заряджатися через опір R_E і напруга U_c на ньому збільшується до U_n . При $U_c > U_n$ p - n -перехід включається та конденсатор розряджається через базу R_1 до напруги U_0 , після чого процес повторюється. Час зарядки конденсатора t_3 набагато більше часу лавинної розрядки і майже період коливань $T \gg t_3$, а частота

$$f = \frac{1}{T} = \frac{I_e}{C(U_n - U_0)}, \quad (1)$$

де I_e – струм зарядки конденсатора через опір R_e .

Вихідні імпульси струму знімаються з резистора R_1 . Верхня частина бази ОПТ (від емітера до B_2) є пасивною та її опір може бути включений у опір R_2 . У промисловому ОПТ типу КТ117 ця частина бази мінімальна. Величини $U_n = I_6 r_{60}$ та $U_0 = I_6 r_{6n}$, де I_6 – струм через базу B_2 , r_{60} – опір нижньої частини бази ОПТ ($E - B_1$) при $I_e = 0$, а r_{6n} – її мінімальний опір при інжекції $I_e > 0$.

Відповідно,

$$f = \frac{I_e}{C I_6 (r_{60} - r_{6n})}, \quad (2)$$

Дія простого сенсора-генератора (рис. 2) заснована на тому, що при зовнішньому впливі на ОПТ змінюються величини $r_{\text{бo}}$ і $r_{\text{бн}}$, що визначаються електропровідністю бази $\sigma = qn\mu_n \sim \frac{1}{r_{\text{б}}}$, де n – концентрація; m_n – рухливість електронів. Це призводить до зміни частоти вихідного сигналу.

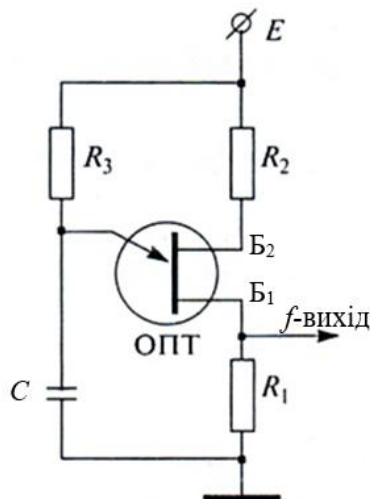


Рис. 2. Схема генератора на основі ОПТ

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою цієї статті є розробка принципово нових електронних датчиків, сенсорів-перетворювачів, принцип роботи яких заснований на використанні зміни напруги на прямозміщеному р-п – переході при заданому прямому струмі, на основі генератора на одноперехідному транзисторі з частотним виходом. Сформульовані і теоретично обґрунтовані вимоги, які пред'являються до структури діодів і транзисторів, вживаних в якості датчиків. Показано, що для поліпшення параметрів датчиків необхідно використати транзистори з високоомного кремнію з тонкою базою і малою концентрацією в ній основній домішці. Також, збільшення чутливості досягається заміною пасивних резисторів та конденсатора на чутливі до вимірюваного впливу елементи (діоди, транзистори тощо).

Ці схеми виміру і пристрою не мають рухливих механічних частин і механізмів, їх вихідні сигнали є повністю електронними.

У статті експериментально показано, що якщо замість пасивних резисторів та конденсатора використовувати напівпровідникові діоди та транзистори, чутливі до визначуваного впливу, то величини I_e , I_b та C також будуть змінюватися і чутливість сенсора в десятки разів збільшується.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

1. Сенсори температури

Зі зростанням температури концентрація носіїв заряду в базі ОПТ збільшується, а опори $r_{\text{бo}}$, $r_{\text{бн}}$ та їх різниця зменшуються, що зумовлює зростання вихідної частоти сенсора. Для підвищення термочутливості $\Delta f / \Delta T^\circ$ можна замість R_3 використовувати польовий МДП-транзистор (ПТ1 на рис. 3), в якому концентрація носіїв заряду мала і зі зростанням температури зростає, що призводить до зростання I_e та додаткового збільшення частоти.

Замість R_2 також можна використовувати польовий транзистор з p - n -переходом в якості затвору ПТ2, в якому концентрація основних носіїв велика, а їх рухливість зі зростанням температури зменшується. Це призводить до зменшення струму I_6 та додаткового зростання частоти зі збільшенням температури.

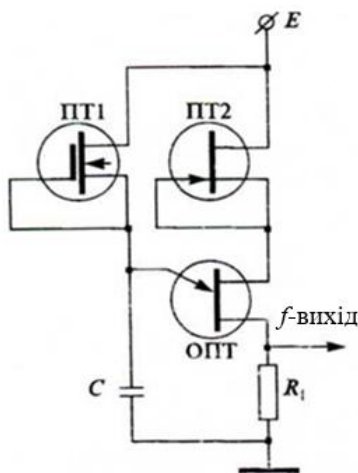


Рис. 3. Схема датчика температури

В експериментальних сенсорах використовувалися промислові транзистори: ОПТ – КТ117, ПТ1 – КП305, ПТ2 – 2П202. На рис. 4 показані залежності струмів ПТ, напруги перемикачання ОПТ та частоти сенсора від температури. Місткість конденсатора 6,8 нФ, $E = 10 - 20$ В, $R_1 = 50$ Ом. Регулювання термочутливості сенсора можна здійснювати введенням змінного резистора в ланцюг затвор-витік польових транзисторів.

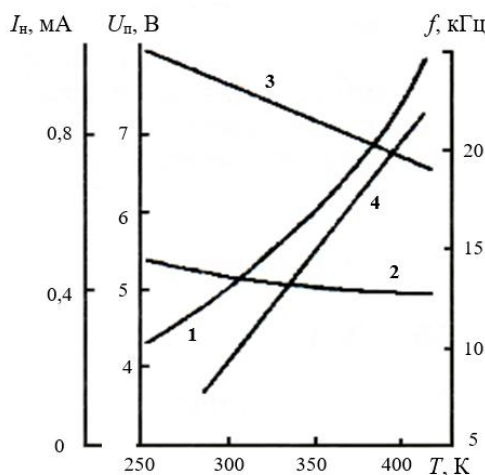


Рис. 4. Залежності струмів насичення польових транзисторів ПТ1 (крива 1), ПТ2 (крива 2) у двополюсному включенні, напруги перемикачання U_n (крива 3) та частоти генератора на ОПТ (крива 4) від температури

Термочутливість сенсора з урахуванням генератора на ОПТ з польовими транзисторами значно вище, ніж сенсора з резисторами. Подальше збільшення чутливості можна отримати використанням в якості конденсатора діода-варикапу. Оскільки перемикачання напруги ОПТ зі зростанням температури зменшується, для цього потрібен варикап, ємність якого зменшується зі зменшенням напруги. Звичайні варикапи з урахуванням p - n -переходів при цьому не підходять, оскільки залежність $C(U)$ у них зворотна. Тому використовувався МДП-варикап, показаний на рис. 5. Він складається з діелектричної плівки Д товщиною d_1 та напівпровідника n -типу [9].

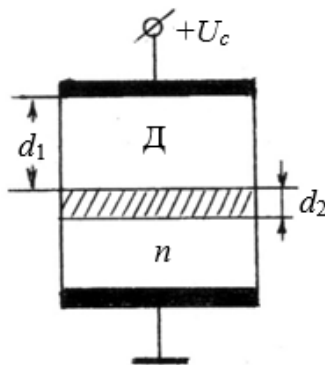


Рис. 5. Структура МДП - варикапу

Як напівпровідник зазвичай використовується кремній, а діелектрик SiO_2 утворюється окисленням кремнію. Еквівалентом діелектричного прокладання конденсатора є плівка $d = d_1 + d_2$, а його ємність

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (3)$$

де S – площа електродів.

Зі збільшенням напруги U_c у плівку d_2 зтягуються електрони і її товщина зменшується, а ємність C збільшується. У сенсорі зі зростанням температури напруга U_n зменшується, що призводить до зменшення і додаткового зростання частоти (2) і збільшення термочутливості.

2. Сенсори оптичного випромінювання

ОПТ широко використовується в якості фотоприймачів [10-13]. Дія світла на ВАХ ОПТ принципово не відрізняється від впливу температури. База ОПТ висвітлюється з боку емітера (рис. 6), що також призводить до зменшення $r_{\text{бo}}$, U_n та зростання частоти зі збільшенням світлового потоку.

Для збільшення фоточутливості сенсора замість R_3 (рис. 2) доцільно використовувати біполярний фототранзистор БФТ, оскільки має найбільшу фоточутливість [3]. Зазвичай він включається як двополюсник (ланцюг емітер-колектор, база вимкнена). Формулу (1) можна переписати як

$$f = \frac{\beta I_{\phi}}{C(U_n - U_o)}, \quad (4)$$

де β – коефіцієнт посилення струму БФТ, а I_{ϕ} – фотострум колектора.

Області бази та емітера БФТ можуть бути вбудовані в область емітера ОПТ. Експерименти із сенсорами-генераторами на основі одного ОПТ у звичайних електричних режимах показують фоточутливість $\sim 0,5$ кГц/мВт (частота/потужність випромінювання P), а в сенсорах ОПТ із БФТ ~ 7 кГц/мВт. Якщо в ланцюзі емітера ОПТ замість БФТ використовувати польовий фототранзистор, то чутливість сенсора набагато менше, але лінійність залежності $f(P)$ значно вища. Застосування МДП-варикапу в якості конденсатора сенсора підвищує чутливість так само, як і в сенсорі температури.

Подальше збільшення чутливості сенсора можна отримати включенням до ланцюга бази ОПТ МДП-фототранзистора [14] (рис. 7).

Він відрізняється від звичайного тим, що між металевим затворним шаром і діелектриком розташований шар напівпровідника n -типу. Контакт метал-напівпровідник (затвор) є діодом Шотткі. При освітленні цієї структури з боку напівпрозорого шару металу в діоді виникає фото-е.д.с.: плюс – на металі, мінус – на напівпровіднику. Це фото-е.д.с. відіграє роль вхідного сигналу для фототранзистора та зменшує концентрацію носія заряду в каналі. Внаслідок цього струм через фототранзистор при освітленні зменшується. В даному випадку весь світ поглинається в n -шарі затвора і до каналу не доходить. Зменшення струму бази ОПТ під впливом світла призводить до збільшення частоти (2) та зростання чутливості сенсора оптичного випромінювання.

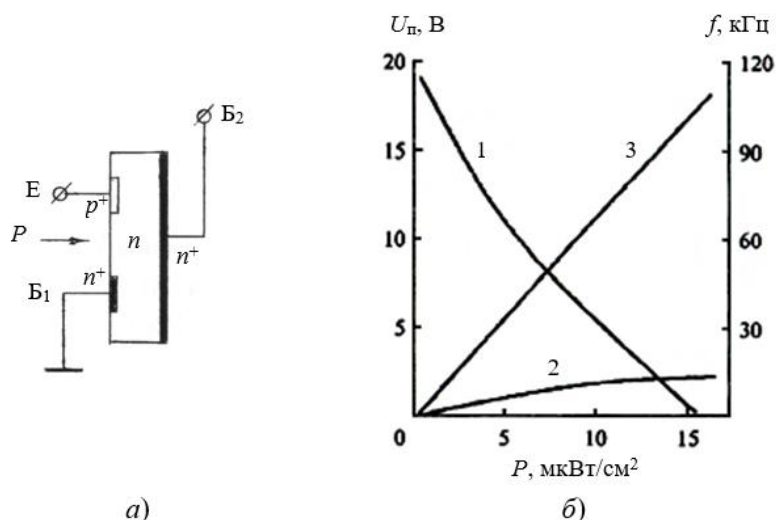


Рис. 6. а) структура ОПТ КТ117; б) залежність напруги перемикання емітера U_n (крива 1), частоти генерації «звичайного» ОПТ (крива 2) та комбінованого фотодетектора (крива 3) від потужності засвічення

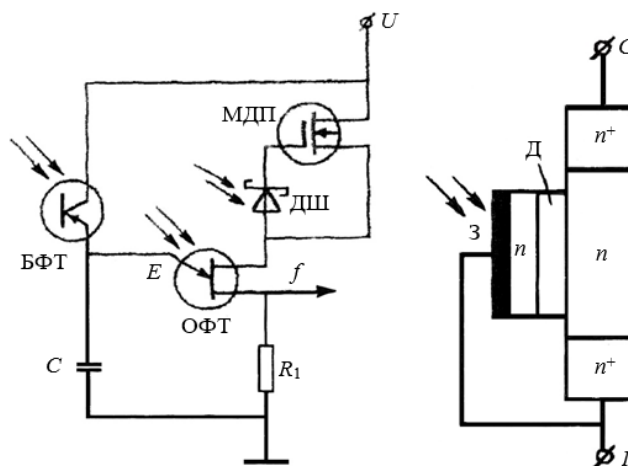


Рис. 7. Схема сенсора оптичного випромінювання та структура МДП-фототранзистора

3. Магніточутливі сенсори

Дія магнітного поля на вхідну ВАХ ОПТ еквівалентна його дії на ВАХ діода з довгою базою [8]. У відсутність магнітного поля інжектовані з емітера E дірки переносяться через базу до виведення B_1 по найкоротшій відстані (рис. 6) [15-20]. У магнітному полі з

перпендикулярним напрямком вектора індукції $\vec{B}$ сила Лоренца відносить їх від поверхні до глибини бази, їх шлях збільшується, що призводить до зростання опору бази $r_{\text{бн}}$. Відповідно, частота генератора на ОПТ із зростанням $r_{\text{бн}}$ збільшується (2). На рис. 8 показано залежність частоти від індукції магнітного поля (крива 1) генератора на ОПТ з резисторами (рис. 2) при $E = 20$ В, $I = 4$ мА, $C = 0,01$ пФ.

Для збільшення магніточутливості замість резисторів генератора можна використовувати магнітодіоди [21]. Магнітодіод МД (рис. 8) є p^+-n -діод з довгою базою ($l \approx L_p$ – довжина дифузійного зміщення дірок), на поверхні якої розташована область s з великою швидкістю рекомбінації інжектованих дірок. При вказаному на рис. 8, а напрямку вектора $\vec{B}$ магнітне поле відхиляє інжектовані дірки від області s , їх концентрація в базі збільшується і опір бази зменшується, а струм зростає. Якщо вставити МД1 в ланцюг емітера генератора на ОПТ (рис. 8, б), то це призведе до зростання I_e і збільшення магніточутливості (2). Якщо ж і в ланцюгу бази ОПТ замінити резистор на МД2 з протилежним розташуванням області s , то в ньому дірки відхиляються магнітним полем до цієї області, їх концентрації зменшується, що призводить до збільшення опору бази та зменшення струму бази ОПТ I_b , а це ще більше збільшує магніточутливість (рис. 8, в, крива 3).

При зміні температури навколишнього середовища величини чисельника і знаменника формули (2) змінюються практично однаково, що забезпечує підвищення термостабільності магніточутливого сенсора. Використання МДП-варикапу збільшує чутливість магнітосенсора так само, як і в сенсорах температури.

Підвищити амплітудну чутливість сенсора-генератора до магнітного поля можна використовуючи для цього двоколекторний магнітотранзистор ДМТ. Структура та схема включення ДМТ показана на рис. 9. Він виготовлений у вигляді пластини n -напівпровідника з базовими контактами B_1 та B_2 на кінцях, двома p -колекторами K_1 та K_2 на протилежних бічних гранях та з емітером E біля B_1 [22-25].

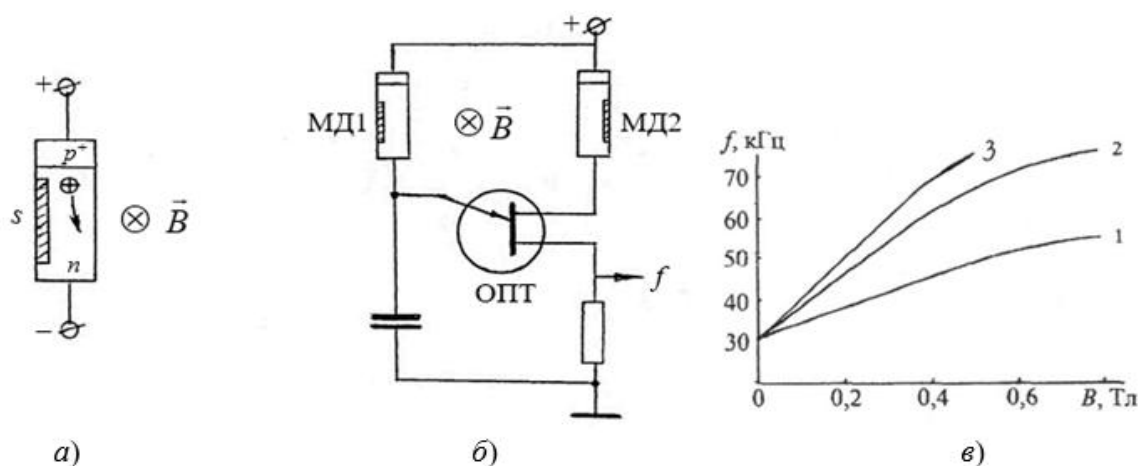


Рис. 8. а) структура МД; б) схема сенсора на основі ОПТ із МД; в) залежність вихідної частоти сенсора на основі ОПТ та МД від магнітної індукції (1 – ОПТ, 2 – ОПТ та МД1, 3 – ОПТ та МД1, МД2)

Принцип дії ДМТ із вихідним сигналом постійного струму дуже простий. Конденсатор C при цьому вимкнено. У відсутність магнітного поля інжектовані з p -емітера дірки проходять між колекторами і розподіляються порівну між ними, їх потенціали рівні та вихідна напруга $V = 0$.

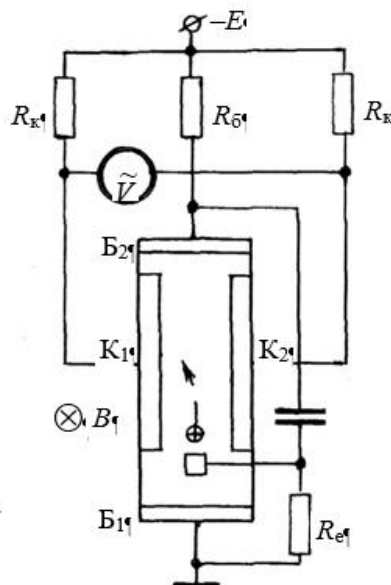


Рис. 9. Схема сенсора магнітного поля на основі ДМТ та ОПТ

У магнітному полі із зазначеним напрямом $\vec{AB}$ більшість дірок відхиляється силою Лоренца до колектора K_1 , його струм збільшується, а струм колектора K_2 зменшується. Відповідно потенціал V_1 зменшується, а V_2 збільшується і вихідна напруга $\tilde{V} = V_2 - V_1$ зростає і зі збільшенням магнітного поля. При зворотному напрямку магнітного поля змінюється полярність вихідного сигналу.

При роботі сенсора з вихідним сигналом змінного струму гранична структура між контактами B_1 і B_2 з емітером E поміж них використовується як ОПТ. При підключенні конденсатора ОПТ працює як генератор імпульсів. Інжектвані в момент розряду конденсатора дірки також перерозподіляються між колекторами ДМТ. Відповідно, вихідний сигнал має форму імпульсів, амплітуда яких зростає зі збільшенням магнітного поля [26].

Досвідчені зразки таких сенсорів виготовлялися за планарною технологією на основі кремнію n -типу $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Відстань між базовими контактами 350 мкм, між колекторами 150 мкм. Величини опорів і ємності в генераторі такого ж порядку, як і попередніх схемах генератора на ОПТ. При $E = 100 \text{ В}$ магніточутливість становила 15 – 20 В/Тл. ОПТ та МД зазвичай виготовляються з високоомного n -кремнію, тому вони можуть бути виконані у вигляді однієї мікросхеми.

4. Сенсори радіації

Вплив радіації на електрофізичні параметри напівпровідників виявляє в тому, що під дією потоку частинок з високою енергією (електронів, гамма-квантів, нейтронів і позитронів) у напівпровіднику утворюються дефекти типу вакансій та міждоузельних атомів, які часто залишаються і після припинення дії радіації [27]. Ці дефекти зменшують концентрацію і рухливість носіїв заряду, що призводить до зростання питомого опору. Найбільше збільшується опір бази ОПТ $r_{\text{он}}$ та U_0 за рахунок зменшення часу життя інжектованих носіїв у базі. Відповідно при радіаційному опроміненні частота генератора на ОПТ зростає (2). Наприклад, при опроміненні ОПТ потоком електронів $\Phi = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ з енергією 4 МеВ частота генератора збільшується з 350 Гц до 1,8 кГц [28].

Для збільшення радіаційної чутливості можна за аналогією з термочутливими сенсорами використовувати у схемі генератора на ОПТ замість резисторів польові транзистори (рис. 3).

Фізичні механізми дії радіації і температури на струм насичення МДП-транзисторів ПТ₁ і польових транзисторів з *p-n*-переходом ПТ₂ дещо відрізняються, але результат той самий: струм ПТ₁ зі зростанням радіації збільшується, а струм ПТ₂ зменшується [29]. У схемі генератора це призводить до зростання I_e та зменшення I_k , що збільшує залежність частоти (2) від радіації. Експерименти з тими самими транзисторами, що у схемі рис. 3 і в тих же електричних режимах показали, що введення ПТ в схему генератора на ОПТ збільшують його радіаційну чутливість в 5-10 разів [30].

5. Газочутливі сенсори

Генератор на основі ОПТ з польовими транзисторами можна використовувати як газочутливий сенсор. Чутливими елементами в такому сенсорі є МДП-транзистори з індукованим каналом [31]. На рис. 10 показана структура такого транзистора на базі *n*-напівпровідника з областями витоку – *I* та стоку – *C* *p*⁺-типу.

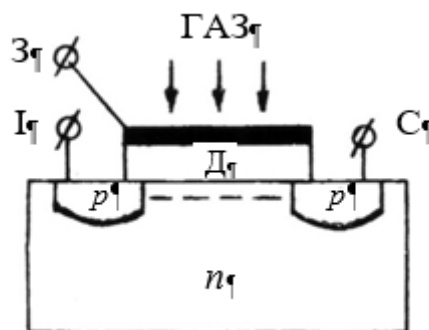


Рис. 10. Конструкція газочутливого МДП-транзистора

Вхідним ланцюгом є ланцюг виток-затвор, а вихідний виток-стік. При подачі на затвор негативної напруги U_z електрони відштовхуються від поверхні і утворюється на ній канал *p*-типу (пунктирна лінія), що з'єднує *p*-області витоку і стоку. При зміні U_z змінюється товщина каналу та вихідний струм I_{ic} . В якості затвору використовується тонка плівка металу (порядку 10 нм), яка адсорбує атоми вимірюваного газу, внаслідок чого змінюється контактна різниця потенціалів ϕ_k між металом і діелектриком, що є частиною послідовного ланцюга виток-затвор і U_z . Відповідно, змінюється вихідний струм I_{ic} пропорційно концентрації вимірюваного газу. Чутливість до певного газу визначається складом металевої плівки затвора, наприклад, затвор із нікелю або платини чутливий до водню. У транзисторі з базою *p*-типу і витком та стоком *n*-типу при цьому ж металі затвора знак зміни I_{ic} буде протилежний.

У сенсорі з частотним виходом МДП-транзистори включаються як двополюсники до звичайної схеми генератора (рис. 3). В якості ПТ1 використовується МДП-транзистор зі зростаючим струмом зі збільшенням концентрації вимірюваного газу, а в якості ПТ2 зі зменшуючим. Також, як і інших сенсорах, зміни струмів МДП-транзисторів призводять до зростання частоти зі збільшенням концентрації газу [32].

У розглянутих сенсорах концентрація газу вимірюється щодо зміни характеристик іншої речовини, на яку діє газ. Однак можна вимірювати концентрацію газу та за електрофізичними характеристиками самого газу. Однією з таких характеристик є відносна магнітна проникність газу μ , що визначає величину магнітної індукції B в газі поміщеному в магнітне поле напруженістю H

$$B = \mu_0 \mu H, \quad (5)$$

де постійна $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м. У вакуумі $\mu = 1$, всі гази відносяться або до парамагнітних $\mu > 1$, або до діамагнітних $\mu < 1$.

У неоднорідному магнітному полі на тіло, всередині якого знаходиться газ, діє сила, що втягує тіло в область з більшою B ($\mu > 1$), або виштовхує його ($\mu < 1$). За величиною цієї сили можна визначати концентрацію навколишнього тіла газу. Для цього потрібен складний електромеханічний перетворювач, що перетворює силу в електричний сигнал.

Але можна вимірювати концентрацію газу за величиною магнітної індукції всередині газу. Як відомо, всередині тіла, поміщеного в магнітне поле, лінії індукції поля згущуються ($\mu > 1$) або послаблюються ($\mu < 1$). Найбільшою величиною $\mu \gg 1$ характеризується кисень. Отже, якщо кисень помістити в магнітне поле величина B усередині його збільшуватиметься пропорційно концентрації кисню [33]. На цій основі діє електронний газоаналізатор кисню (рис. 11).

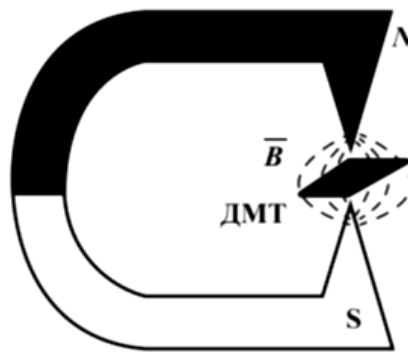


Рис. 11. Конструкція газоаналізатора

При припливі газу в проміжок між загостреними полюсами магніту лінії індукції магнітного поля згущуються і величина індукції зростає зі збільшенням концентрації газу. Величина реєструється ДМТ-магніточутливим датчиком, вихідний сигнал якого є величиною, за якою визначається концентрація газу. Для цього може бути використаний або біполярний магнітотранзистор, напруга з якого є вихідним сигналом, або генератор на основі ОПТ з магнітiodадами, списаний в п.3, частота змінного сигналу з якого залежить від B .

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

Грунтуючись на результатах дослідження, є всі підстави вважати, що електронні аналізатори (сенсори-перетворювачі) зовнішніх впливів стануть обов'язковим атрибутом майбутніх автономних суден без екіпажу. Вони зможуть в майбутньому не лише замінити класичні прилади, але і дозволять, в режимі реального часу, оперативно інформувати операторів берегових центрів управління судами про поточну обстановку для ухвалення потрібних рішень по забезпеченню безпеки судноплавства.

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] Vikulin I.M. Combined semiconductor injection magnetic field sensors for wireless information networks. / I.M. Vikulin, L.F. Vikulina, V.E. Gorbachev, S.A. Mikhailov // Radioelectronics and Communication Systems, 2020, Vol. 63, № 7, pp. 368-375. — Allerton Press. — N.-Y. — 2020. <https://doi.org/10.20535/S0021347020070043>.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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>.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Pettinato S., Orsini A., Salvatori S., "Compact current reference circuits with low temperature drift and high compliance voltage," *Sensors*, vol. 20, no. 15, p. 4180, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20154180>.

- [17] Carvalho R. *et al.*, “A low-power CMOS current reference for piezoelectric energy harvesters,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 67, no. 8, pp. 3403–3410, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/TED.2020.2998095>.
- [18] D. van Treeck *et al.*, “Electroluminescence and current–voltage measurements of single-(In,Ga)N/GaN-nanowire light-emitting diodes in a nanowire ensemble,” *Beilstein J. Nanotechnol.*, vol. 10, pp. 1177–1187, 2019, doi: <https://doi.org/10.3762/bjnano.10.117>.
- [19] Osipov D., Paul S., “Compact extended industrial range CMOS current references,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 66, no. 6, pp. 1998–2006, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/TCSI.2019.2892182>.
- [20] Osipov D., Paul S., “Temperature-compensated beta-multiplier current reference circuit,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 64, no. 10, pp. 1162–1166, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/TCSII.2016.2634779>.
- [21] Wenger Y., Meinerzhagen B., “A stable CMOS current reference based on the ZTC operating point,” in *2017 13th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*, 2017, pp. 273–276, doi: <https://doi.org/10.1109/PRIME.2017.7974160>.
- [22] Cordova D., de Oliveira A.C., Toledo P., Klimach H., Bampi S., Fabris E., “A sub-1 V, nanopower, ZTC based zero-VT temperature-compensated current reference,” in *2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2017, pp. 1–4, doi: <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2017.8050289>.
- [23] Kondo K., Tamura H., Tanno K., “High-PSRR, low-voltage CMOS current mode reference circuit using self-regulator with adaptive biasing technique,” *IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci.*, vol. E103.A, no. 2, pp. 486–491, 2020, doi: <https://doi.org/10.1587/transfun.2019EAP1061>.
- [24] Wang L., Zhan C., “A 0.7-V 28-nW CMOS subthreshold voltage and current reference in one simple circuit,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 66, no. 9, pp. 3457–3466, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/TCSI.2019.2927240>.
- [25] Ding L., Wang Y., Bao Z., Liao H., Jin X., “A nano-ampere current reference circuit in a 0.5 μm CDMOS technology,” *Microelectron. J.*, vol. 90, pp. 336–341, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2019.02.003>.
- [26] Chen Y., Tan X., Yu B., Li C., Guo Y., “A new all-in-one bandgap reference and robust zero temperature coefficient (TC) point current reference circuit,” in *2017 IEEE 12th International Conference on ASIC (ASICON)*, 2017, pp. 541–544, doi: <https://doi.org/10.1109/ASICON.2017.8252532>.
- [27] Siddiqi Y., Ahmed N., Shahbaz M. A., Jawed S. A., “Process and temperature invariant on-chip current reference circuit,” in *2017 First International Conference on Latest trends in Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELLECT)*, 2017, pp. 1–5, doi: <https://doi.org/10.1109/INTELLECT.2017.8277643>.
- [28] Kondo K., Tanno K., Tamura H., Nakatake S., “Low voltage CMOS current mode reference circuit without operational amplifiers,” *IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci.*, vol. E101.A, no. 5, pp. 748–754, 2018, doi: <https://doi.org/10.1587/transfun.E101.A.748>.
- [29] Huang Z., Zhu X., Li Z., “Design of a high precision current mode band gap reference circuit,” in *2019 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE)*, 2019, pp. 178–181, doi: <https://doi.org/10.1109/EITCE47263.2019.9095076>.

- [30] Torres R., Roa E., Rueda L. E. G., “On the design of a reliable current reference for systems-on-chip,” *Int. J. Circuit Theory Appl.*, vol. 49, no. 7, pp. 2032–2046, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/cta.2955>.
- [31] Hu J., Lu C., Xu H., Wang J., Liang K., Li G., “A novel precision CMOS current reference for IoT systems,” *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 130, p. 153577, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153577>.
- [32] Torres R., Rueda L. E. G., Cuevas N., Roa E., “On the design of reliable and accurate current references,” in *2020 IEEE 11th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS)*, 2020, pp. 1–4, doi: <https://doi.org/10.1109/LASCAS45839.2020.9069041>.
- [33] Shinde S. V., “Ultra-low power current reference based on flat band difference of MOSFETs,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1729, p. 012011, 2021, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1729/1/012011>.