

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. С. Осадчук, О. В. Осадчук**

**МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ  
МАГНІТНОГО ПОЛЯ  
З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ**

**Монографія**

**Вінниця  
ВНТУ  
2013**

УДК 621.383; 621.317

ББК 32.854.2

О-72

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 06.03.2013 р.)

Рецензенти:

**Р. Л. Голяка**, доктор технічних наук, професор

**В. Ю. Кучерук**, доктор технічних наук, професор

**Осадчук, В. С.**

О-72 Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 264 с.

ISBN 978-966-641-530-4

В монографії проаналізовано сучасний стан перетворювачів магнітного поля, подано основи побудови мікроелектронних перетворювачів магнітного поля з частотним виходом на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором. Розглянуто принципи побудови, електричні схеми і експериментальні дослідження основних параметрів мікроелектронних перетворювачів магнітного поля. Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються проектуванням і розробкою мікроелектронних перетворювачів магнітного поля, а також на аспірантів та студентів вищих технічних навчальних закладів.

**УДК 621.383; 621.317**

**ББК 32.854.2**

**ISBN 978-966-641-530-4**

© В. Осадчук, О. Осадчук, 2013

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП .....	8
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ .....	9
1.1 Магніторезистори.....	9
1.2 Сенсори на основі магнітодіодного ефекту.....	13
1.3 Сенсори на основі ефекту Холла .....	22
1.4 Конструкції вимірювальних перетворювачів магнітного поля на основі ефекту Холла .....	35
1.5 Магніотранзистори.....	42
1.6 Магніточутливі інтегральні напівпровідникові перетворювачі магнітного поля.....	51
1.7 Оптичні та електромеханічні сенсори магнітного поля.....	61
2 ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ПРОТІКАЮТЬ У ПРОВІДНИКАХ І НАПІВПРОВІДНИКАХ ПРИ ДІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ.....	64
2.1 Методика вимірювання магнітного поля в провідниках .....	64
2.2 Фізичний механізм взаємодії магнітного поля з напівпровідниками .....	69
2.3 Вплив магнітного поля на властивості напівпровідників. Ефект Холла.....	75
2.4 Вплив магнітного поля на електропровідність напівпровідників .....	80
3 МАГНІТОРЕАКТИВНИЙ ЕФЕКТ У НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУРАХ .....	88
3.1 Фізичні процеси, що протікають у біполярних магніотранзисторах при дії магнітного поля.....	88
3.2 Фізичні процеси, що протікають у біполярних двоколекторних магніотранзисторах при дії магнітного поля .....	92
3.3 Моделювання магнітореактивного ефекту в біполярних транзисторних структурах.....	96
3.4 Розподіл концентрації інжектованих носіїв заряду в базовій області при дії магнітного поля в біполярних магніточутливих структурах .....	106
3.5 Магнітореактивний ефект у польових транзисторах .....	112

4	МІКРОЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З МАГНІТОЧУТЛИВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВІ МАГНІТООПОРІВ І МАГНІТОДІОДІВ .....	124
4.1	Виведення функції перетворення і рівняння чутливості мікроелектронного перетворювача магнітного поля з магнітоопором.....	124
4.2	НВЧ перетворювач магнітного поля на біполярно-польовій транзисторній структурі з магнітоопором.....	133
4.3	Мікроелектронний частотний перетворювач магнітної індукції на основі двох біполярних транзисторів з магніторезистором .....	136
4.4	Виведення функції перетворення і рівняння чутливості магнітного перетворювача з магнітодіодом .....	140
4.5	Виведення функції перетворення і рівняння чутливості частотного перетворювача магнітної індукції на основі двох біполярних транзисторів з магнітодіодом .....	149
4.6	Розрахунок функції перетворення та рівняння чутливості частотного перетворювача магнітного поля на біполярній транзисторній структурі з активною індуктивністю і магнітодіодом .....	152
5	МІКРОЕЛЕКТРОННІ ЧАСТОТНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧУТЛИВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВІ СЕНСОРІВ ХОЛЛА .....	156
5.1	Виведення функції перетворення і рівняння чутливості магнітного частотного перетворювача на біполярно-польовій транзисторній структурі з сенсором Холла.....	156
5.2	Виведення функції перетворення і рівняння чутливості магнітного перетворювача на основі біполярного і двозатворного МДН транзисторів з сенсором Холла .....	161
5.3	Виведення функції перетворення і рівняння чутливості частотного магнітного перетворювача на основі біполярного і двозатворного МДН транзисторів з активним індуктивним елементом та сенсором Холла .....	163
5.4	Математичне моделювання частотних перетворювачів магнітного поля з сенсором Холла та активною індуктивністю.....	168
5.5	Математичне моделювання частотного перетворювача магнітного поля на основі біполярної транзисторної структури з сенсором Холла.....	175
5.6	Математичне моделювання частотного перетворювача магнітного поля на основі біполярної транзисторної структури .....	183

5.7 Математичне моделювання частотного перетворювача магнітного поля на основі біполярної транзисторної структури з сенсором Холла в активній індуктивності .....	185
<b>6 МІКРОЕЛЕКТРОННІ ЧАСТОТНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З МАГНІТОЧУТЛИВИМИ БІПОЛЯРНИМИ ТА ПОЛЬОВИМИ ТРАНЗИСТОРАМИ .....</b>	<b>189</b>
6.1 Мікроелектронний частотний перетворювач магнітного поля на основі магніточутливого польового транзистора .....	189
6.2 Виведення функції перетворення і рівняння чутливості частотного магнітного перетворювача з магніточутливим біполярним транзистором .....	195
6.3 Математичне моделювання частотного перетворювача на біполярній магніточутливій структурі з активним індуктивним елементом.....	199
6.4 Мікроелектронний перетворювач магнітного поля на основі двоколекторного магнітотранзистора.....	203
6.5 Розрахунок функції перетворення та рівняння чутливості частотних перетворювачів на основі магніточутливого двоколекторного транзистора в біполярно-польовій транзисторній структурі .....	210
6.6 Визначення функції перетворення та рівняння чутливості частотних перетворювачів магнітного поля на основі двоколекторного магніточутливого біполярного транзистора з активним індуктивним елементом.....	216
<b>7 РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ З ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ .....</b>	<b>224</b>
7.1 Вибір критеріїв оцінювання технічного рівня розроблених перетворювачів .....	224
7.2 Рекомендації з проектування мікроелектронних частотних магніточутливих перетворювачів.....	226
7.3 Оцінювання метрологічних параметрів частотних перетворювачів магнітного поля .....	232
<b>ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>241</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- $\mu_n$  і  $\mu_p$  – рухливість електронів і дірок  
 $q$  – заряд електрона  
 $k$  – стала Больцмана  
 $\epsilon_0$  – абсолютна діелектрична стала  
 $\epsilon_d$  – відносна діелектрична проникність підзатворного шару діелектрика товщиною  $d$   
 $\epsilon_H$  – відносна діелектрична проникність матеріалу напівпровідника  
 $S_B$  – площа р-п переходу області витоку  
 $\phi_K$  – контактна різниця потенціалів  
 $N_a$  – концентрація акцепторної домішки  
 $I_{SS}$  – зворотний струм р-п переходу підкладки  
 $U_{be}$ ,  $U_{bc}$  – відповідно напруга база-емітер і база-колектор  
 $U_{js}$  – контактна різниця потенціалів переходу колектор-підкладка  
 $NE$  – коефіцієнт неідеальності емітерного переходу  
 $NC$  – коефіцієнт неідеальності колекторного переходу  
 $NS$  – коефіцієнт неідеальності переходу підкладки  
 $U_{AF}$  – напруга Ерлі в нормальному режимі  
 $U_{AR}$  – напруга Ерлі в інверсному режимі  
 $I_{KF}$  – точка початку спаду залежності коефіцієнта підсилення струму в схемі з загальним емітером ( $\beta_F$ ) від струму колектора в нормальному режимі  
 $I_{KR}$  – точка початку спаду залежності коефіцієнта підсилення струму в схемі з загальним емітером ( $\beta_R$ ) від струму емітера в інверсному режимі  
 $NK$  – коефіцієнт, що обумовлює множник  $Q_b$ , який рівний 0,5  
 $R_{bx}$  – максимальний об'ємний опір бази при нульовому зміщенні  
 $R_{bm}$  – максимальний опір бази при великих струмах  
 $I_{Rb}$  – струм бази, з яким опір бази зменшується на 50 %  
 $R_f$  – опір фоторезистора  
 $C_f$  – ємність фоторезистора  
 $C_{GD}$  – ємність затвор-стік транзистора VT2  
 $\omega$  – кругова частота  
 $f$  – робоча частота  
 $Z$  – ширина каналу  
 $L$  – довжина каналу  
 $W$  – товщина бази

$L_p$  – дифузійна довжина дірок  
 $T$  – температура  
 $S_T$  – крутизна транзистора  
 $g_0$  – провідність каналу польового транзистора  
 $I_{30}$  – тепловий струм р-п переходу затвору польового транзистора  
 $m$  – коефіцієнт, який враховує ефект модуляції р-п переходу затвору польового транзистора  
 $\phi_T$  – температурний потенціал  
 $U_0$  – напруга відсічки польового транзистора  
 $I_{CH}$  – струм стоку насичення польового транзистора  
 $U_{BE}$  – напруга на електродах витік польового транзистора та емітер біполярного транзистора  
 $I_0$  – тепловий струм колектор-база біполярного транзистора  
 $U_0$  – ефективна порогова напруга (напруга відсічки)  
 $U_3^*$  – напруга на затворі в режимі насичення  
 $L_{екв}$  і  $C_{екв}$  – еквівалентні індуктивність і ємність коливального контуру генератора  
 $\gamma_T$  – температурний коефіцієнт напруги відсічки  
 $I_E, I_K$  – зовнішні струми електродів емітера і колектора біполярного транзистора  
 $I_{E0}, I_{K0}$  – теплові струми відповідно емітерного і колекторного переходів  
 $\alpha_N$  – коефіцієнт передачі емітерного струму  
 $\alpha_I$  – коефіцієнт передачі колекторного струму (інверсного включення)  
 $U_{EB}, U_{KB}$  – напруги, які прикладені відповідно до переходів емітер-база й колектор-база  
 $G_E$  і  $B_E$  – відповідно еквівалентні активна і реактивна складові провідності ТСВО  
 БТ – біполярний транзистор  
 БСТІТ – біполярний статично індукований транзистор  
 ВАХ – вольт-амперна характеристика  
 ВО – від'ємний опір  
 ГЕК – генератор електричних коливань  
 ЗЗ – зворотний зв'язок  
 МДН – метал-діелектрик-напівпровідник  
 ПТ – польовий транзистор  
 СІТ – статично індукований транзистор  
 ТСВО – транзисторна структура з від'ємним опором

## ВСТУП

Науково-технічний прогрес нерозривно пов'язаний з подальшим вдосконаленням засобів вимірювання, покращенням їх якості та автоматизації процесу вимірювання, створення нових засобів автоматичних приладів радіовимірювальної техніки, електроніки та автоматики.

Все більшого і більшого значення у теперішній технологічній час набувають сенсори. Сучасний стан розвитку промисловості вимагає точного виконання технології та широкого застосування автоматизації виробничих процесів. Стан вітчизняної економіки великою мірою визначається успішним розв'язанням питань створення та освоєння серійного випуску автоматичних засобів технічної діагностики машин та обладнання, контролю параметрів докільця тощо. Сенсори ж є ключовим підходом для руху вперед автоматизації багатьох галузей промисловості, вдосконалення багатьох приладів і збільшення їх конкурентоспроможності [1, 2].

Подальший розвиток електронізації галузей народного господарства висуває нові вимоги до сенсорів: на зміну ненадійним, громіздким приладам повинні прийти сенсори сумісні з іншими виробами мікроелектроніки. До таких сенсорів ставляться вимоги: висока точність, однозначність, точність вимірювання, вибірковість, тобто здатність виділення сигналу на фоні інших зовнішніх факторів, низька вартість, багатофункціональність – здатність до одночасного контролю декількох різних впливів, працездатність у жорстких експлуатаційних умовах, надійність, довговічність [3–7].

Важливим різновидом вимірювальних перетворювачів є магнітні сенсори. Мікросхемні сенсори магнітного поля володіють високою чутливістю до вимірювальних параметрів, малою масою, габаритами, інформаційною та конструктивною і технологічною сумісністю з мікроелектронними засобами обробки інформації.

На їх основі створюються безколекторні електродвигуни постійного струму, схеми електронного запалювання автомобілів, пристрої синхронізації швидкості обертання електродвигунів, безіндукційні головки зчитування магнітних записів та інше.

Новим напрямком в розробці мікроелектронних перетворювачів магнітного поля є створення частотних перетворювачів на основі напівпровідникових структур з від'ємним опором.

Тому для реалізації переваг перетворення «магнітне поле – частота» необхідно розробити елементи теорії магнітореактивного ефекту в польових транзисторних структурах, що зроблено у ході науково-дослідної роботи і результати подано у монографії.



# 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Магнітні вимірювання знаходять практичне застосування при дослідженні властивостей матеріалів, випробуванні магнітних деталей і елементів, у магнітній дефектоскопії, при вивченні магнітних полів Землі, при вимірюванні і контролі магнітних полів в установках атомної і ядерної фізики та інше.

Основними величинами, що характеризують магнітне поле, є магнітний потік, магнітна індукція і напруженість магнітного поля. Магнітні матеріали оцінюють за їхніми характеристиками і параметрами – статичними і динамічними.

Вимірювані магнітні величини звичайно попередньо перетворюються в електричні, більш зручні для вимірювання. Перетворювачі магнітних величин в електричні будуються на основі явищ електромагнітної індукції, ядерного магнітного резонансу, гальваномагнітного і деяких інших.

На даний час у всіх галузях вимірювальної техніки (окрім телеметрії) використовуються виключно такі структури, в яких вихідною величиною є величина струму або напруги. Це приводить до значних похибок вимірювання, втрат інформації в каналі між виходом перетворювача і входом підсилювально-перетворювальної апаратури, малих потужностей вихідного сигналу перетворювачів, їх низькою заводськiстю і швидкодією. З іншого боку, видатні досягнення мікроелектронної технології в основному були реалізовані у засобах обробки інформації та обчислювальної техніки, в яких значна номенклатура функціональних елементів вийшла на 7–8 рівень інтеграції із застосуванням базових технологічних процесів.

Важливою різновидністю вимірювальних перетворювачів є магнітні сенсори. Мікросхемні сенсори магнітного поля володіють високою чутливістю до вимірювальних параметрів, малою масою, габаритами, інформаційною та конструктивною і технологічною сумісністю з мікроелектронними засобами обробки інформації.

Тому основною задачею є вибір первинних вимірювальних перетворювачів магнітного поля як чутливих елементів частотних мікроелектронних перетворювачів магнітного поля. Проблематика цих питань розглядається у цьому розділі.

## 1.1 Магніторезистори

Магніторезисторні елементи діють за законом електродинаміки, відповідно до якого на рухливі носії зарядів у магнітному полі діє си-

ла Лоренца, що змушує електрони рухатися по скривлених траєкторіях, тобто подовжуючи шлях струму і збільшуючи опір матеріалу. Ступінь відхилення електронів залежить від їхньої рухливості; вона максимальна в напівпровідниках, таких як антимонід індію, у якого рухливість складає  $78000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  у порівнянні з  $50 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  для металів. Магніторезистори виготовляють з антимоніду індію чи арсеніду індію, що має рухливість  $24000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ .

Магніторезистори чутливі до загального магнітного поля, а не до швидкості його зміни. Це важливо для переносних сенсорів, що можуть рухатися з невизначеною швидкістю.

На рис. 1.1 показана магніторезистивна характеристика. Де  $H_0$  – ефективне поле анізотропії в металі, що являє собою суму розмагнічувального поля анізотропії і поля анізотропії, що виникає в елементарному процесі осадження матеріалу. Під час відсутності зовнішнього поля уздовж елемента довжини в точці  $O$  утвориться доменна намагніченість. З ростом поля опір зростає доти, поки на ділянці  $b$  елементи не повернуться на  $45^\circ$  щодо елемента довжини. Подальше зростання поля приводить до насичення на ділянці  $c$ . Магніторезистор може працювати в точці  $O$  чи на ділянці  $b$  за допомогою зовнішнього магніту, що створює зсув. На ділянці  $b$  прилад має лінійну характеристику.

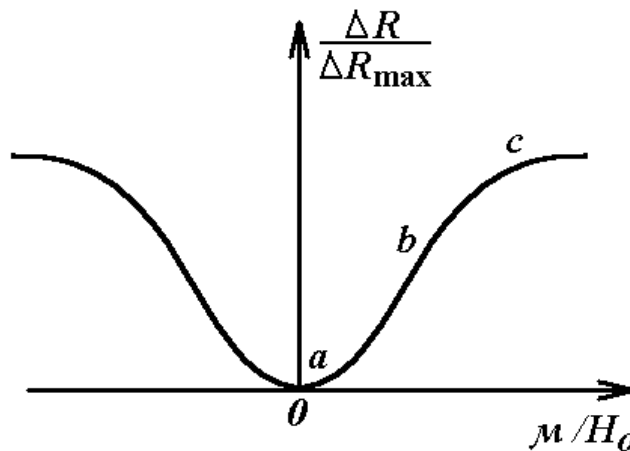


Рисунок 1.1 – Основна магніторезистивна характеристика [8]

Магніторезистивний ефект зростає зі зменшенням відношення довжини до ширини ( $l/W$ ) приладу (рис. 1.2). Для одержання високого внутрішнього опору за відсутності магнітного поля і великої зміни опору з ростом магнітного поля кілька приладів з низькими відношеннями  $l/W$  можуть з'єднуватися послідовно. Це може бути зроблене нанесенням металевої плівки на довгий шматок напівпровідника і травленням частини її поверхні до утворення растра з короткозамкнутими провідними перемичками (рис. 1.3 а). Коли прикладається ма-

гнітне поле лінії струму повертаються на холлівський кут  $\theta$  (рис. 1.3 б).

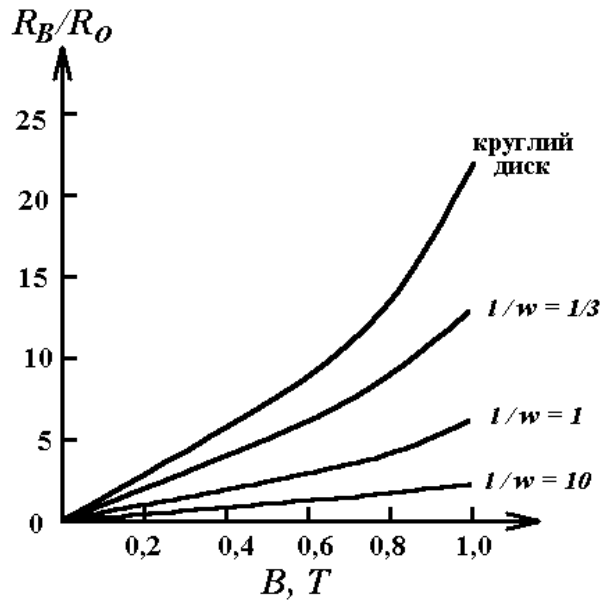


Рисунок 1.2 – Магніторезистивні криві для приладів різної геометрії [8]

Оскільки поверхні металевих провідників екіпотенціальні, струм повертається по них до протилежної сторони кристала, а в кожній наступній напівпровідниковій секції знову тече під кутом  $\theta$ . Внутрішній опір пристрою можна змінювати в широких межах вибором відношення  $l/W$ .

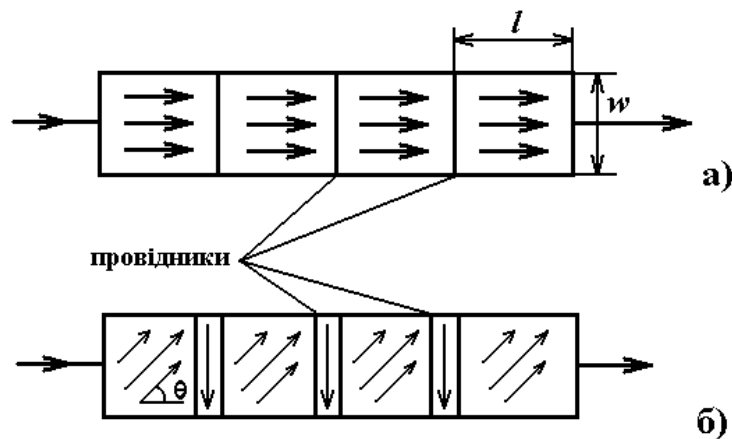


Рисунок 1.3 – Лінії струму в растровому магніторезистивному елементі: а – без магнітного поля; б – у магнітному полі [8]

Замість застосування зовнішніх металевих короткозамкнених ліній поперек напівпровідникового матеріалу може бути отриманий матеріал з паралельно-орієнтованими кристалами на основі металевого антимоніду нікелю. Ці кристали діють як внутрішні короткозамкнуті лінії. Без магнітного поля лінії струму розташовуються під прямим ку-

том до екіпотенціальних поверхонь металевих кристалів, проте під дією прикладеного поля лінії струму повертаються на холлівський кут  $\theta$  і утворюють зигзагоподібні траєкторії в матеріалі (рис. 1.4).

Магніторезистори виконують осадженням плівки товщиною близько 25 мкм з антимоніду індію або антимоніду нікелю на підкладку товщиною 0,1 мм. Плівка має форму меандра; опір при відсутності магнітного поля може варіюватися зміною розмірів цього меандра і числа петель.

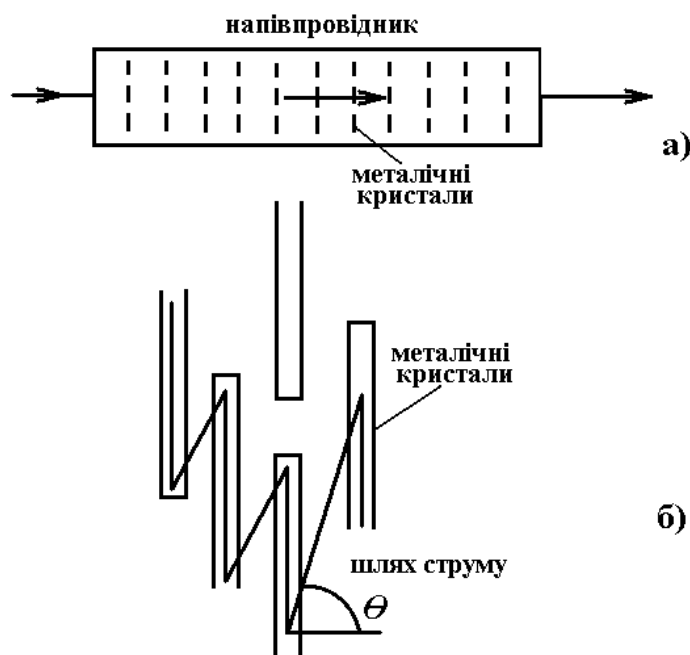


Рисунок 1.4 – Напівпровідник із внутрішніми короткозамкненими металічними кристалами: а – шлях струму за відсутності магнітного поля; б – шлях струму у магнітному полі [8]

Плівка ізолюється від підкладки, яка може бути виготовлена з магнітного матеріалу з тонким ізолюючим покриттям з немагнітного матеріалу, наприклад кераміки чи пластмаси.

Опір залежить від напрямку магнітного поля, як показано на рис. 1.5. Максимальна зміна опору має місце, коли кристали антимоніду нікелю паралельні один одному, а магнітне й електричне поля спрямовані під кутом один до одного. Температурний відгук магніторезисторів залежить від матеріалу легуючих домішок. Як правило, опір зменшується з температурою і падіння опору відбувається швидше після прикладення магнітного поля, так що відношення опору в магнітному полі до опору під час відсутності поля зменшується з температурою.

Магніторезистори мають низькі шуми, якщо тільки в матеріалі не виникають тріщини через помилковий монтаж. Оскільки пристрій має

об'ємний опір, він не підлягає впливу поверхневих ефектів і характеризується дуже малим старінням. В основному старіння відбувається через псування епоксидних смол, які застосовуються, щоб вмонтувати пристрій у корпус чи прикріпити напівпровідник до підкладки.

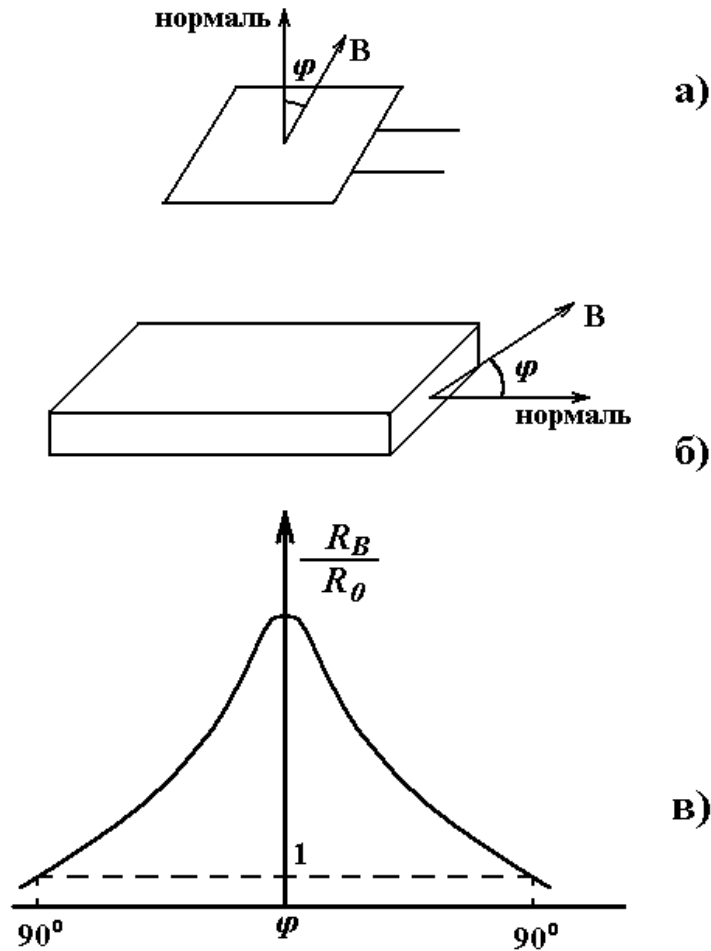


Рисунок 1.5 – Вплив напрямку магнітного поля на магніторезистор: а і б – напрямки поля; в – крива опору [8]

## 1.2 Сенсори на основі магнітодіодного ефекту

Магнітодіодним ефектом прийнято називати різку зміну електричного опору напівпровідникового діода з довгою базою, увімкненого в пряму напрямку, у результаті дії на діод поперечного магнітного поля [9]. Для пояснення цього ефекту розглянемо явища, що виникають у діоді, зображеному на рис. 1.6.

Він має р-п-перехід, тобто контакт напівпровідників з електронною і дірковою провідністю в одному монокристалі. Перехід у цьому випадку несиметричний – концентрація рівноважних носіїв у р-області значно більша, ніж у п-області, тобто п-область є більш високоомною, ніж р-область.

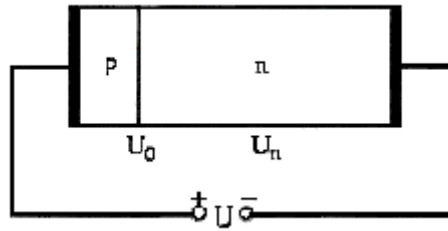


Рисунок 1.6 – Структура магніодіода

Під час приєднання до р-напівпровідника позитивного полюса зовнішнього джерела живлення, а до п-напівпровідника – негативного відбувається інжекція дірок із р-області в п-область. Внаслідок цього в обох частинах р-п-переходу почне відповідно зростати концентрація електронів і дірок. Якщо рівень інжекції достатньо високий, то провідність п-області буде визначатися концентрацією нерівноважних носіїв. Інжектвані дірки дифундують від р-п-переходу всередину п-напівпровідника на деяку відстань  $L$ , яка називається дифузійною довжиною. На цій відстані концентрація нерівноважних носіїв зменшується внаслідок рекомбінації в  $e$  раз. При високих рівнях інжекції [7]

$$L = \sqrt{\frac{2 \cdot b \cdot D_{eff} \cdot \tau}{b + 1}},$$

де  $b = \mu_n / \mu_p$  – відношення рухливостей електронів і дірок;  $\tau$  – час життя носіїв;  $D_{eff}$  – коефіцієнт спільної дифузії.

Внесок нерівноважних носіїв струму в електропровідність п-області сильно залежить від значення дифузійної довжини. Чим менше  $L$ , тим менша концентрація нерівноважних носіїв струму в п-напівпровіднику і тим більший його опір.

Якщо розташувати досліджуваний діод в поперечному магнітному полі, то коефіцієнт дифузії  $D_{eff}$  нерівноважних носіїв струму зменшиться внаслідок викривлення траєкторії руху носіїв під дією сили Лоренца. Вплив магнітного поля тут особливо значний, оскільки при спільній дифузії нерівноважних електронно-діркових пар практично відсутнє поле Холла, яке могло б частково компенсувати викривлення траєкторії. Тому поперечне магнітне поле викликає зменшення дифузійної довжини, а отже, і зростання опору п-області. Вплив зменшення  $L$  на зростання опору довгої п-області досягає максимуму при деякому значенні співвідношення  $d/L$ , де  $d$  – довжина п-області. Для германію, наприклад, оптимальне значення  $d/L = 4 \dots 6$ .

Отже, при дії поперечного магнітного поля на діод (рис. 1.6), через який протікає достатньо великий прямий струм, дифузійна довжина

інжектіваних у n-напівпровідник дірок зменшується. Це, у свою чергу викликає збільшення опору n-напівпровідника і, як наслідок, перерозподіл напруги  $U_0$  (що спадає на p-n переході) і напруги  $U_n$  (що спадає на n-області):  $U_n$ , зростає, а  $U_0$  зменшується, причому  $U_0 + U_n = \text{const}$ . Зменшення напруги на p-n-переході призведе до зменшення інжекції дірок із p-n-переходу і до нового збільшення опору n-напівпровідника. Останнє викликає новий перерозподіл напруги, нове зменшення інжекції і т. д. У результаті мале початкове зменшення дифузійної довжини в магнітному полі призводить до дуже сильного зменшення прямого струму через діод (внаслідок різкого зменшення середньої концентрації нерівноважних носіїв струму).

При розташуванні діода з довгою базою у магнітному полі паралельно його подовжній осі, інжектівані в базу електрони і дірки починають обертатися навколо осі в перпендикулярній площині [10]. При цьому відбувається утворення згустків плазми, що чергуються зі збідненими областями. Якщо на бічних гранях діода встановити два симетричних зонди (типу холлівських контактів), то обертання згустків і збіднених областей плазми в перпендикулярній площині приведе до появи змінної ЕРС між зондами. Коливання струму, що протікає через діод симетричної структури, при цьому не відбувається, тому що перерозподіл плазми в перпендикулярній площині не змінює сумарної концентрації і загального опору. При порушенні симетрії розподілу вихідної концентрації носіїв заряду щодо осі (змінюючи швидкості поверхневої рекомбінації на одній грані, бічним підсвічуванням і т. д.) виникнення змінної ЕРС на поперечних зондах супроводжується виникненням коливань струму, що протікає через діод.

У довгих діодах прямий струм визначається нерівноважною провідністю базової області. Розподіл носіїв у базовій області залежить від рухливості й ефективного часу життя. У магнітному полі внаслідок ефекту магнітоопору зменшується рухливість носіїв і, отже, сильно зменшується провідність діода. Ефект магнітоопору за рахунок зміни інжекції підсилюється в десятки і сотні разів. Магніточутливість довгих діодів, названих магнітодіодами, у багато разів перевищує магніточутливість магніторезисторів так само, як фоточутливість інжекційних фотодіодів перевищує фоточутливість звичайних фотодіодів і фоторезисторів [11].

Магнітне поле в магнітодіодах не тільки зменшує рухливість, але і викривляє лінії струму, тому що в них концентрації електронів і дірок практично однакові і поле Холла відсутнє. Подовження ліній струму приводить до зменшення глибини проникнення нерівноважних носіїв і додаткового зменшення модуляції провідності базової області інжектіваними носіями, тобто до підвищення магніточутливості.

Скривлення ліній струму підвищує концентрацію носіїв з однієї грані і знижує з іншої. Оскільки ефективний час життя носіїв у тонких пластинках визначається поверхневою рекомбінацією, то перерозподіл носіїв приводить до зміни ролі поверхневої рекомбінації й ефективного часу життя. Роль рекомбінації на грані, до якої відхиляються носії, зростає, проте рекомбінація на другій грані майже перестає відігравати роль.

Якщо швидкості рекомбінації на гранях однакові, то ефективний час життя зменшується і відповідно струм такого магнітодіода в магнітному полі зменшується. Якщо швидкість рекомбінації на одній грані багато менша, ніж на іншій (рис. 1.7), то при відхиленні носіїв до цієї грані роль рекомбінації на другій грані з високою швидкістю рекомбінації різко зменшується. Ефективний час життя при такій полярності магнітного поля буде зростати, тому струм магнітодіода також буде зростати. При протилежному напрямку магнітного поля буде спостерігатися звичайний магнітодіодний ефект – струм різко убуває з ростом магнітного поля (рис. 1.8 а).

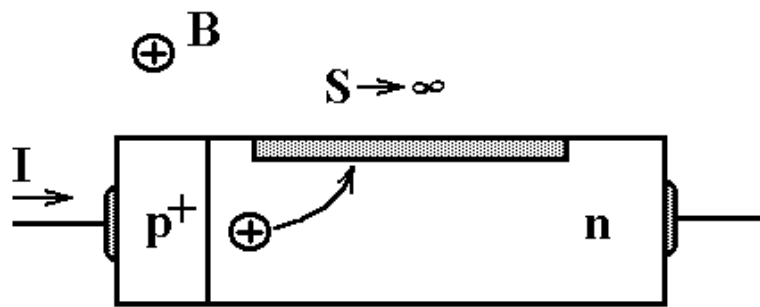


Рисунок 1.7 – Структура магнітодіода з областю високої швидкості рекомбінації  $S$  на одній грані [11]

У довгих діодах з від’ємним опором ( $S$ -діодах) магнітне поле, що знижує концентрацію нерівноважних носіїв унаслідок магнітодіодного ефекту, приводить до зростання напруги зриву і різкого підвищення напруги при заданому струмі після зриву (рис. 1.8 б). При досить великій напруженості магнітного поля область від’ємного опору може цілком зникнути. Магніточутливість  $S$ -магнітодіодів набагато більша, ніж звичайних магнітодіодів.

Основною характеристикою магніторезисторів і магнітодіодів, а також деяких інших гальваноманітних приладів є вольтова магніточутливість. Вона дорівнює відношенню зміни напруги на зразку до добутку струму через нього і зміни індукції магнітного поля, яка приводить до цієї зміни напруги:

$$\gamma_H = \Delta U / (\Delta BI).$$



У германієвих і кремнієвих магнітодіодах  $\gamma_H = 30 \dots 90 \text{ В}/(\text{А} \cdot \text{Т})$ . Чутливість магнітодіодів можна змінювати в структурі з польовим МДН-електродом на бічній грані. Зміна напруги на цьому електроді змінює поверхневий потенціал напівпровідника, а відповідно і швидкість поверхневої рекомбінації.

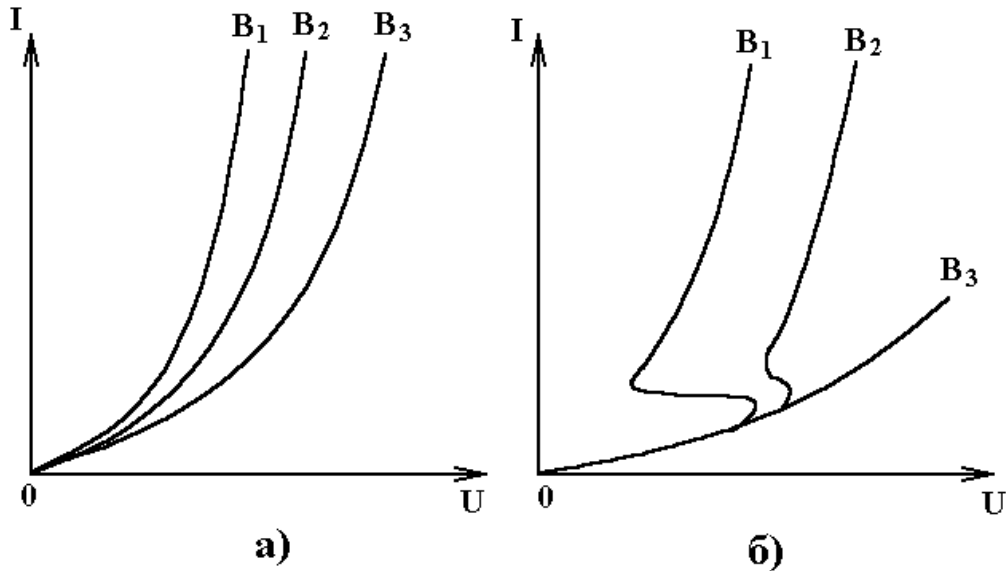


Рисунок 1.8 – Вплив магнітного поля на вольт-амперні характеристики довгого діода (а) і S-діода (б) у прямому зміщенні при  $B_3 > B_2 > B_1$  [8]

У якості магніточутливих діодів можуть використовуватися і світло-діоди, причому в залежності від індукції магнітного поля може змінюватися як інтенсивність, так і довжина хвилі випромінювання. Наприклад, при довжині бази  $W < L$  ( $L$  – довжина дифузійного зсуву інжекттованих носіїв заряду) частина носіїв рекомбінує у базі з випромінюванням, а інші рекомбінують на контакті до бази без випромінювання. Скривлення траєкторії руху носіїв у поперечному магнітному полі приведе до того, що довжина шляху носіїв у базі збільшиться і число носіїв, рекомбінованих у шарі  $W$ , зросте. Відповідно зросте й інтенсивність випромінювання.

Якщо за базу світлодіода з  $W > L$  узяти напівпровідник із плавно змінною шириною забороненої зони, наприклад зі зменшуваною  $E_g$  при віддаленні від р-п переходу, то ширина спектра випромінювання

$$\Delta \nu = (E_{gg} - E_{gL}) / h,$$

де  $E_{gg}$  – ширина забороненої зони бази біля межі р-п переходу;  $E_{gL}$  – на відстані  $L$  від неї. У поперечному магнітному полі  $L$  зменшується,

що приводить до відповідного збільшення  $E_{gl}$  і зменшення ширини спектра випромінювання. Магніточутливі світлодіоди особливо зручні при передачі інформації про напруженість магнітного поля по оптичному каналу зв'язку, оскільки відпадає необхідність у перетворенні електричного сигналу в оптичний.

При розташуванні діода з довгою базою у магнітному полі паралельно його подовжній осі, інжектвані в базу електрони і дірки починають обертатися навколо осі в перпендикулярній площині [11]. При цьому відбувається утворення згустків плазми, що чергуються зі збідненими областями. Якщо на бічних гранях діода встановити два симетричних зонди (типу холлівських контактів), то обертання згустків і збіднених областей плазми в перпендикулярній площині приведе до появи змінної ЕРС між зондами. Коливання струму, що протікає через діод симетричної структури, при цьому не відбувається, тому що перерозподіл плазми в перпендикулярній площині не змінює сумарної концентрації і загального опору. При порушенні симетрії розподілу вихідної концентрації носіїв заряду щодо осі (змінюючи швидкості поверхневої рекомбінації на одній грані, бічним підсвічуванням і т. д.) виникнення змінної ЕРС на поперечних зондах супроводжується виникненням коливань струму, що протікає через діод.

У роботі [12] розглядається магнітодіод, конструкція якого представлена на рис. 1.9. Магнітодіод містить пластину з напівпровідникового матеріалу з S-подібною вольт-амперною характеристикою. До пластини примикають інжектований і омичний лінійні контакти. З метою підвищення чутливості до магнітного поля, один з контактів виконаний у вигляді рівнобедреного трикутника з вершиною, спрямованою в глибину бази магнітодіода.

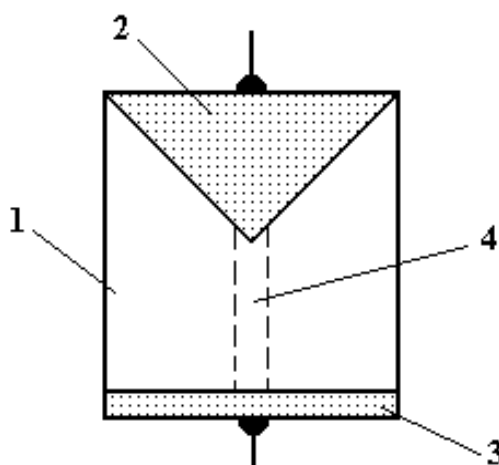


Рисунок 1.9 – Конструкція магнітодіода: 1 – пластина з напівпровідникового матеріалу (кремній, германій, арсенід галію); 2, 3 – контакти; 4 – шнур високої густини струму

Зменшення рухливості носіїв заряду відбувається за рахунок накладення магнітного поля, що викликає збільшення опору бази з відповідним перерозподілом прикладеної до діода напруги між р-n переходом і товщею бази. При цьому зменшення напруги на р-n переході сприяє зменшенню інжекції, концентрації інжекттованих у базу носіїв і, їхнього часу життя. Що приводить до нового збільшення опору бази і зменшенню струму через діод (тобто підвищення напруги на діоді при заданому струмі через нього).

На рис. 1.10 показана одна із структур інтегрального магніодіода, виготовленого з використанням типової МОП технології.

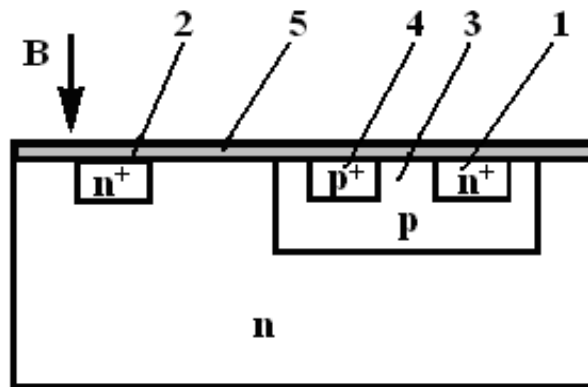


Рисунок 1.10 – Структура магніодіода

Область емітера 1 і контакт до колектора 2 магніодіода реалізовані на основі n+ областей стоку-витоку n-МОП транзистора, базова область 3 формується на основі дифузійної області кишень р-типу, контакт до базової області 4 – на основі р+ областей стоку-витоку р-МОП транзистора, колектором є підкладка n-типу.

В цій конструкції межа розділу оксид-кремній 5 грає роль поверхні з низькою швидкістю рекомбінації, а зворотно зміщений р-n перехід база-колектор – роль поверхні з високою швидкістю рекомбінації носіїв заряду.

Відмітні особливості цього приладу: магніточутливий елемент ефективно працює при високому рівні інжекції; корисний сигнал знімається між електродами емітер-база [12].

У роботі [13] запропонована оригінальна конструкція магніодіода, виготовленого за технологією «кремній на сапфірі» (КНС).

На рис. 1.11 показаний один з варіантів структури такого приладу. Електрони і дірки з n+ і р+ областей інжектуються в слабо леговану n-область, де вони дрейфують під впливом електричного поля.

Поверхня розділу (Si-SiO<sub>2</sub>) в пластині має низьку швидкість рекомбінації S, в порівнянні з швидкістю рекомбінації S<sub>2</sub> нижньої межі ро-

зділу ( $\text{Si-Al}_2\text{O}_3$ ). Магнітне поле в площині відхиляє носії заряду до однієї з площин і у вольтамперній характеристиці відбуваються відповідні зміни. Прилад має високу магнітну чутливість; проте є і деякі недоліки.

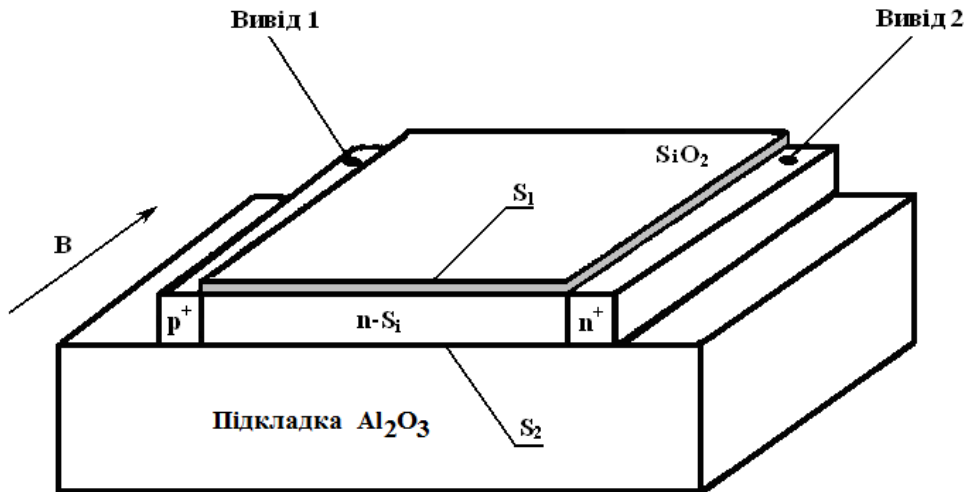


Рисунок 1.11 – Структура магнітодіода, виготовленого за технологією «кремній на сапфірі»

Основним недоліком вважається сильна нелінійність енергетичної характеристики чутливості, яка залежить від напрямку впливального магнітного поля. Додаткові проблеми створює велика залежність параметрів приладу від температури [13].

З появою халькогенідного напівпровідникового скла були розроблені магнітодіоди, що мають специфічні характеристики [14].

Дія магнітодіодів заснована на використанні оригінальних властивостей халькогенідного скла. Шари халькогенідного напівпровідникового скла, якщо їх помістити між металевими електродами, мають симетричні вольтамперні характеристики з ділянками негативного опору, що розділяють два можливі стійкі стани – високоомний і низькоомний. При певних складах халькогенідного скла такі структури після переходу в низькоомний стан залишаються в ньому і після зняття напруги зсуву, тобто в них спостерігається ефект «пам'яті». Перепад опорів у високоомному і низькоомному стані може перевищувати 3...4 порядки при відношенні порогової напруги до залишкової до 10...50 разів. Ефекти перемикавання і «пам'яті» визначаються об'ємними процесами і не пов'язані з існуванням р-п або гетеропереходів.

На рис. 1.12 показана структура магнітодіода з аморфно-кристалічним гетеропереходом, реалізована на базі структур вітчиз-

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гаряинов С. А. Перспективы использования полупроводниковых приборов и устройств с отрицательным сопротивлением в интегральных схемах / С. А. Гаряинов // Полупроводниковая электроника в технике связи: сб. статей / под ред. И. Ф. Николаевского. – 1986. – Вып. 26. – 80 с.
2. Серков А. А. Обоснование методов снижения погрешности измерения параметров магнитных полей / А. А. Серков, С. И. Гридчин, В. В. Князев // Пролемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры: 7-я ВНТК: тезисы докладов. – Ленинград, 1989. – Ч.1. – С. 41–43.
3. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника / Ю. Р. Носов. – М. : Советское радио, 1980. – 230 с.
4. Серков А. А. Анализ влияния электромагнитных помех на качество каналов связи информационных систем / А. А. Серков, В. И. Кравченко // Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. пр.: Електроенергетика і перетворююча техніка. – 2004. – № 4 – С. 14–16.
5. Серков А. А. Исследование помехозащищенности измерителей электромагнитных полей / А. А. Серков, С. И. Гридчин, В. В. Князев // Метрология в радиоэлектронике: 7-я ВНТК: тезисы докладов. – М., 1988. – С. 56–59.
6. Осадчук В. С. Сенсори тиску і магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2005. – 207 с.
7. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: в 3 т. Т. 3. / За ред. З. Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2002. – 475 с.
8. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений: пер. с англ. / Ф. Мейзда. – М. : Мир, 1990. – 535 с.
9. А. с. 1675810 СССР, МКИ G 01 R 33/06. Цифровой измеритель магнитной индукции / И. П. Смирнов, А. А. Остапов, О. Т. Чигирин, Ю. Т. Чигирин (СССР). – № 4677080/21; заявл. 11.04.89; опубл. 07.09.91, Бюл. № 33. – 5 с.
10. А. с. 1568010 СССР, МКИ G 01 R 33/06. Магнитометр / В. И. Барышев (СССР). – № 4253725/24–21; заявл. 04.05.88; опубл. 30.05.90, Бюл. № 20. – 5 с.

11. A. Nathan. A triple drain MOSFET magnetic field sensor / A. Nathan, M. J. Huizer, H. P. Baltes. // Can. J. Phys. – 1985. – V. 63. – P. 695–698.

12. А. с. 1568010 СССР, МКИ G 01 R 33/06. Магнитометр / В. И. Барышев (СССР). – № 4253725/24–21; заявл. 04.05.88; опубл. 30.05.90, Бюл. № 20. – 5 с.

13. А. с. 1675810 СССР, МКИ G 01 R 33/06. Цифровой измеритель магнитной индукции / И. П. Смирнов, А. А. Остапов, О. Т. Чигирин, Ю. Т. Чигирин (СССР). – № 4677080/21; заявлено 11.04.89; опубл. 07.09.91, Бюл. № 33. – 5 с.

14. А. с. 1698860 СССР, МКИ G 01 R 33/06. Цифровой измеритель магнитной индукции / И. П. Смирнов, А. Н. Фойда, О. Т. Чигирин, Ю. Т. Чигирин (СССР). – № 4703338/21; заявл. 11.04.89; опубл. 15.12.91, Бюл. № 46. – 4 с.

15. Пат. № 6,278,271 В1 US, МКИ GOIR 33/07. Three dimensional magnetic field sensor / Schott.; заявл. 29.03.99; опубл. 12.01.2001. – 5 с.

16. Пат. № 5,057,890 US, МКИ HO1L 27/22. Hall element / Urs Falk, R. Porovic; заявл. 9.11.1990; опубл. 15.10.91. – 6 с.

17. Пат. № 4,987,467 US, МКИ HO1L 43/06. Integratable Hall element / R. Porovic; заявл. 30.09.88; опубл. 22.07.91. – 5 с.

18. Пат. № 5,572,058 US, МКИ HO1L 29/82. Hall effect device formed in an epitaxial layer of silicon for sensing magnetic fields parallel to the epitaxial layer / James R. Biard; заявл. 17.06.95; опубл. 5.10.96. – 4 с.

19. Пат. № 5,646,527 US, МКИ G01K 33/07. Hall effect device with current and hall-voltage connections / G. Mani, K. Von Klitzing; заявл. 8.03.1994; опубл. 8.07.1997.

20. Пат. № 5,548,181 US, МКИ HO1L 29/82. Hall element for detecting a magnetic field perpendicular to a substrate / H. Funaki, H. Mochizuki; заявл. 7.02.1995; опубл. 20.08.1996. – 5 с.

21. Пат. № 6,742,270 В2 US, МКИ G01C 17/26. Luminescent indication compass / Kao-Hsing Chih; заявл. 16.09.2002; опубл. 1.06.2004. – 6 с.

22. Пат. № 6,292,137 В1 US, МКИ G01S 5/04. Direction indicating compasses / H. J. Agnew, G. D. W. Parfitt; заявл. 10.10.1998; опубл. 18.09.2001. – 5 с.

23. Пат. № 5,571,094 US, МКИ G01C 17/38. Vehicle compass system / Tomas R. Olson, James R. Geschke; заявл. 18.06.1996; опубл. 2.06.1998. – 4 с.

24. Пат. № 5,511,319 US, МКИ G01C 17/38. Vehicle compass correction circuit / Steven L. Geerlings, Mark J. Bussis; заявл. 29.08.1994; опубл. 30.04.1996. – 5 с.

25. Пат. № 5,435,070 US, МКИ G01C 17/02. Simplified compass with multiple segment display capability / Wayne T. Kilian; заявл. 26.07.1993; опубл. 25.07.1995. – 4 с.

26. Пат. № 5,079,845 US, МКИ G01C 17/26. Dual readout analog / Digital magnetic compass / Weldon L. Childers; заявл. 31.08.1990; опубл. 14.07.1992. – 4 с.

27. Пат. № 4,796,365 US, МКИ G01C 17/32. Underwater compass sensor with compass dither / Brian R. Hudson; заявл. 5.09.1987; опубл. 10.07.1989. – 4 с.

28. Большакова И. А. Функционально интегрированный магнитометрический преобразователь / И. А. Большакова, Р. Л. Голяка // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2000. – № 4. – С. 40–42.

29. Добринска Н. И. Датчика Холла (холлотроны) на основе арсенида галлия / Н. И. Добринска, Ц. П. Михайлова, И. Б. Велчев // Микроэлектроника. – 1991. – Т. 20, вып. 2. – С. 183–188.

30. Амеличев В. В. Датчики Холла на МОН-структурах / [В. В. Амеличев, А. И. Галушков, Ю. Н. Миргородский и др.] // Микроэлектроника. – 2000. – Т. 29, № 1. – С. 48–58.

31. Викулин И. М. Гальваномагнитные приборы / И. М. Викулин, Л. Ф. Викулина, В. И. Стафеев. – М. : Радио и связь, 1983. – 104 с.

32. Чаплыгин Ю. А. Введение в технологию кремниевых микроэлектронных датчиков: учебное пособие / Ю. А. Чаплыгин, А. И. Галушков. – М. : МИЭТ, 1996. – 62 с.

33. Кордич С. Интегральные кремниевые датчики магнитного поля / С. Кордич // Sensors & Actuators. – 1986. – № 10. – Р. 34–78.

34. Егиазарян Г. А. Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение / Г. А. Егиазарян, В. И. Стафеев. – М. : Радио и Связь, 1987. – 88 с.

35. Стафеев В. И. Магнитодиоды / В. И. Стафеев, Э. И. Каракушан. – М. : Наука, 1975. – 216 с.

36. Викулин И. М. Магнитотранзисторы / И. М. Викулин. – М. : ЦНИИ «Электроника», 1978. – 49 с.

37. Davies L. W. Magnetotransistor incorporated in an integrated circuit / L. W. Davies, M. S. Wells // Proceedings I. R. E. E. – Australia, 1971. – P. 235–238.

38. Двухколлекторные магнитотранзисторы / И. М. Викулин, М. А. Глауберман, Г. А. Егиазарян и др. // ПиСУ. – 1981. – № 10. – С. 34–35.

39. Пат. № 2008748 Украина, МКИ Н 01 L 29/82. Магнитотранзистор / І. М. Вікулін, М. А. Глауберман, В. В. Егоров.; заявл. 11.02.1992; опубл. 28.02.1994. – 4 с.

40. Пат. № 2055419А1 Российская Федерация, МКИ Н 01 L 29/82. Магниточувствительный биполярный транзистор / А. И. Галушков, А. Н. Сауров, Ю. А. Чаплыгин; заявл. 25.01.1994; опубл. 27.02.1996. – 4 с.

41. Викулина Л. Ф. Действие радиации на чувствительность магнитотранзисторов из высокоомного кремния / Л. Ф. Викулина, П. Ю. Марколенко, О. Б. Шевчук // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2000. – № 5–6. – С. 50–51.

42. Амеличев В. В. Интегральные датчики магнитного поля / В. В. Амеличев, А. И. Галушков, Ф. Г. Зубенко, Ю. А. Чаплыгин // Электронная промышленность. – 1992. – № 3. – С. 58–59.

43. Козлов А. В. Распределение плотности тока в латеральном двухколлекторном магниточувствительном транзисторе / А. В. Козлов, М. А. Ревелева, Р. Д. Тихонов // Труды восьмой международной научно-технической конференции. – Дивноморское, Россия, 2002. – С. 175–178.

44. Викулина Л. Ф. Магниточувствительные транзисторы / Л. Ф. Викулина // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1998. – № 1. – С. 25–28.

45. Чаплыгин Ю. А. Исследование МОП-транзисторов – элементов микросистем на основе КНИ-структур / Ю. А. Чаплыгин, М. А. Королев, И. А. Шумский, В. И. Шевяков // Электроника и информатика: 4-я Международная научно-техническая конференция: тез докл. – М. : МИЭТ. – 2002. – С. 88–89.

46. Коноплев Б. Г. Сенсор магнитного поля на основе карбида кремния / Б. Г. Коноплев, И. Е. Лысенко // Известия вузов. Электроника. – 2001. – № 4. – С. 78–82.



47. Gallagher R. C. A metal-oxide-semiconductor Hall element / R. C. Gallagher, W. S. Corak // Solid State Electron. – 1966. – V. 9. – P. 571–580.

48. Тихонов Р. Д. Исследование биполярного магнитотранзистора с базой в кармане / Р. Д. Тихонов // Датчики и системы. – 2004. – № 12. – С. 42–47.

49. Пат. 13012 РФ, МКІ Н 01 L 29/82. Интегральный биполярный магнитотранзистор / Б. Г. Коноплев, И. Е. Лысенко (РФ). – № 2204144. – 2003. – 5 с.

50. Тихонов Р. Д. Двухколлекторный магнитотранзистор / Р. Д. Тихонов // Нано- и микросистемная техника. – 2006. – № 11. – С. 36–41.

51. Беляев Б. А. Микрополосковый тонкопленочный датчик слабых магнитных полей / Б. А. Беляев, С. В. Бутаков, А. А. Лексиков // Микроэлектроника. – 2001. – Т. 30, № 3. – С. 228–237.

52. Повышение чувствительности детектора на основе тонкой ферромагнитной пленки / К. Н. Гура, П. В. Ивкин, М. Ф. Мхейн, Ф. М. Репа // Известия вузов. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА. – 2001. – № 2. – С. 77–81.

53. Гура К. Н. Измерение разности фаз сигналов СВЧ на тонкой ферромагнитной пленке / К. Н. Гура, М. Ф. Мхейн, Ф. М. Репа // Известия вузов. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА. – 2001. – № 8. – С. 78–81.

54. Многокомпонентные матричные преобразователи в системах визуализации магнитного поля / И. В. Терещенко, А. А. Абакумов, А. А. Абакумов (мл.), Ю. А. Чаплыгин [и др.] // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления «Датчик–2001»: XIV научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов: материалы конф. – М. : МИЭТ. – 2002. – С. 165–166.

55. Абакумов А. А. Двухкомпонентный матричный преобразователь для систем визуализации магнитного поля / А. А. Абакумов, А. А. Абакумов (мл.), А. И. Галушков, Ю. А. Крупнов // Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники: VIII международная научно-техническая конференция. – Дивноморское, 2002. – Часть 2. – С. 152–154.

56. Галушков А. И. Исследования режима самокомпенсации температурного изменения чувствительности ячейки интегрального мат-

ричного преобразователя магнитного поля / А. И. Галушков, С. А. Поломошнов // Российско-германская конференция: Датчики и системы. – СПб., 2002. – Том I. – С. 57–60.

57. Поломошнов С. А. Разработка и исследование параметров элементной базы магниточувствительных микросистем / С. А. Поломошнов // Микроэлектроника и информатика-2002: IX всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов. – М. : МИЭТ. – 2002. – С. 16.

58. Пат. 7408 УКРАЇНА, МКІ Н 01 L 29/82. Мікроелектронний сенсор магнітної індукції / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк (УКРАЇНА). – № 20041510196; заявл. 13.12.2004; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6. – 4 с.

59. Пат. 7409 УКРАЇНА, МКІ Н 01 L 29/82. Частотний магнітний сенсор / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк (УКРАЇНА). – № 20041510197; заявл. 13.12.2004; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6. – 4 с.

60. Smith C. S. Piezoresistance effect in germanium and silicon / C. S. Smith // Phys. Rev. – 1954. – V. 54, No. 1. – P. 42.

61. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи / В. И. Ваганов. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.

62. Егизарян Э. Л. Проектирование микродатчиков давления / Э. Л. Егизарян // Микроэлектроника. – № 6. – 1981. – С. 20–22.

63. Ваганов В. И. Интегральный транзисторный преобразователь давления / В. И. Ваганов, П. П. Поливанов // Электронная техника. – 1988. – Серия 11, вып. 4. – С. 89–92.

64. Викулин И. М. Полупроводниковые датчики / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Сов. радио, 1975. – 104 с.

65. Готра З. Ю. Технология микроэлектронных устройств. Справочник / З. Ю. Готра. – М. : Радио и связь, 1991. – 528 с.

66. Измерение электрических и неэлектрических величин: учебное пособие для ВУЗов / Н. Н. Евтихийев, Я. А. Купершмидт, В. Ф. Папуловский, В. Н. Скугоров; под ред. Н. Н. Евтихиева. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

67. Смит Р. Полупроводники / Р. Смит. – М. : Из-во иностранной литературы, 1962. – 467 с.

68. Стельбаньс Л. С. Физика полупроводников / Л. С. Стельбаньс. – М. : Советское радио, 1967. – 451 с.

69. Киреев П. С. Физика полупроводников / П. С. Киреев. – М. : Высшая школа, 1975. – 583 с.
70. Петровский И. И. Электронная теория полупроводников / И. И. Петровский. – Минск: Высшая школа, 1964. – 218 с.
71. Gallagher R. C. A metal-oxide-semiconductor Hall element / R. C. Gallagher, W. S. Corak // Solid State Electron. – 1966. – V. 9. – P.571–580.
72. Балтес Г. П. Интегральные полупроводниковые датчики магнитного поля / Г. П. Балтес, Р. С. Попович // ТИИЭР. – 1986. – Т. 74, № 8. – С. 60–90.
73. Гуменюк С. В. Интегральные полупроводниковые магнито-чувствительные датчики / С. В. Гуменюк, Б. И. Подлепецкий // Зарубежная электронная техника. – 1989. – № 12(343). – С. 3–47.
74. Hammert R. S. Invariance of the Hall effect MOSFET to gate geometry / R. S. Hammert // Solid State Electron. – 1974. – V. 17. – P. 1039–1043.
75. Hirata M. Integrated magnetic sensor / M. Hirata, S. Suzuki // Elec. Eng. of Japan. – 1982. – P. 37–40.
76. Popovic R. S. A MOS Hall device free from short-circuit effect / R. S. Popovic // Sensors and Actuators. – 1984. – V. 5. – P. 253–262.
77. A. Nathan. Numerical analysis of MOS magnetic field sensor / A. Nathan // M. Sc. thesis, Univ. of Alberta. – Edmonton, Alta., Canada, 1984. – 32 с.
78. Nathan A. A triple drain MOSFET magnetic field sensor / A. Nathan, M. J. Huiser, H. P. Baltes // Can. J. Phys. – 1985. – V. 63. – P. 695–698.
79. Викулин И. М. Полупроводниковые датчики / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Сов. радио, 1975. – 104 с.
80. Виглеб Т. Датчики / Т. Виглеб. – М. : Мир, 1989. – 196 с.
81. Schaumburg H. Sensoren / H. Schaumburg. – Stuttgart: Teubner, 1992. – Т. 3. – 583 р.
82. Викулин И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Радио и связь, 1990. – 264 с.
83. Викулин И. М. Магнито-чувствительные транзисторы / И. М. Викулин, Л. Ф. Викулина, В. И. Стафеев // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35, вып. 1. – С. 3–10.

84. DeMey G. Potential calculations in hall plates / G. DeMey // *Adv. Electron. Electron Phys.* – 1983. – V. 61. – P. 1–62.
85. Fluitman J. H. J. Hall-effect device with both voltage leads on one side of the conductor / J. H. J. Fluitman // *J. Phys. E.: Sci. Instrum.* – 1980. – V. 13. – P. 783–785.
86. Pfleiderer H. Magnetodiode model / H. Pfleiderer // *Solid-State Electron.* – 1972. – V. 15. – P. 335–353.
87. Бабичев Г. Г. Вертикальный двухколлекторный тензотранзистор с ускоряющими электрическими полями в базе и эмиттере / Г. Г. Бабичев, С. И. Козловский, В. А. Романов // *Физика и техника полупроводников.* – 1999. – Т. 33, № 3. – С. 370–379.
88. Бронштейн И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1981. – 718 с.
89. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем: монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 275 с.
90. Осадчук В. С. Элементы теории магнитоактивного эффекта в биполярных чувствительных элементах для частотных магнитных перетворювачів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: збірник наукових праць.* – Хмельницький: ТУП, 2002. – Т. 1, № 9. – С. 62–67.
91. Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля / за ред. З. Ю. Готри. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2001. – 412 с.
92. Mohan Roa G. R. Magnetic sensitivity of a MAGFET of uniform channel current density / Roa G. R. Mohan, W. N. Carr // *Solid-State Electron.* – 1971. – V. 14. – P. 995–1001.
93. Mohan Roa G. R. Magnetic sensitivity of a MAGFET of uniform channel current density / Roa G. R. Mohan, W. N. Carr // *Solid-State Electron.* – 1971. – V. 14. – P. 995–1001.
94. Исследование биполярного двухколлекторного тензотранзистора с ускоряющим электрическим полем в базе / Г. Г. Бабичев, В. И. Гузь, И. П. Жадько [и др.] // *Физика и техника полупроводников.* – 1992. – Т. 26, вып. 7. – С. 1244–1250.
95. Перераспределение электрического потенциала в искусственно анизотропной полупроводниковой пластине с кольцевыми

электродами / В. И. Гузь, И. П. Жадько, С. И. Козловский [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1990. – Т. 24, № 3. – С. 409–412.

96. Бойко Н. Н. Электрические и фотоэлектрические свойства полупроводников с анизотропной проводимостью / Н. Н. Бойко, В. А. Романов // Физика и техника полупроводников. – 1977. – Т. 11, № 5. – С. 817–835.

97. Викулина Л. Ф. Физика сенсоров температуры и магнитного поля / Л. Ф. Викулина, М. А. Глауберман. – Одесса: Маяк, 2000. – 156 с.

98. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: в 3 т. Т. 2. / за редакцією З. Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2003. – 595 с.

99. Исследование магниточувствительности транзисторных структур с диффузионным переносом инжектированных носителей / М. А. Глауберман, В. В. Егоров, В. В. Козел, Н. А. Канищева // ФТП. – 2003. – Т. 37, вып. 1. – С. 32–36.

100. Молчанов П. А. Основи нелінійної теорії транзисторних негетронів / П. А. Молчанов. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1998. – 208 с.

101. Горяинов С. А. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением / С. А. Горяинов, И. Д. Абезгауз. – М. : Энергия, 1970. – 320 с.

102. Арефьев А. А. Эквиваленты приборов с отрицательным дифференциальным сопротивлением / А. А. Арефьев, А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова. – М. : Знание, 1987. – 62 с.

103. Полупроводниковые аналоги реактивности / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, О. Н. Негоденко, В. П. Путилин. – М. : Знание, 1990. – 62 с.

104. Степанова Л. Н. Принципы построения управляемых устройств с отрицательным и нулевым дифференциальным сопротивлением / Л. Н. Степанова // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. – 1990. – Вып. 3(137). – С. 60–65.

105. Бенинг Ф. Отрицательное сопротивление в электронных схемах / Ф. Бенинг. – М. : Советское радио, 1975. – 286 с.

106. Есаки Л. Туннельный диод / Л. Есаки. – Токио: Из-во Токийского университета, 1958. – 236 с.

107. Лямбда-диод многофункциональный прибор с отрицательным сопротивлением / Г. Кано, Х. Ивада, Х. Токоли, И. Терамото // Электроника. – 1975. – № 13. – С. 48–53.

108. Wu C. Y. An analysis and the fabrication technology of the lambda bipolar transistor / C. Y. Wu // IEEE Trans. Electron Devices. – 1980. – V. ED-27. – P. 414–419.

109. Пат. № 2092933 Российская Федерация, МКИ H01L 29/82. Полупроводниковый датчик магнитного поля / В. С. Осадчук, Е. В. Осадчук, А. В. Осадчук. – № 95114069; заявл. 8.08.1995; опубл. 10.10.1997. – Бюл. № 28. – 3 с.

110. Марченко А. Н. Управляемые полупроводниковые резисторы / А. Н. Марченко. – М. : Энергия, 1978. – 215 с.

111. Березин А. С. Технология и конструирование интегральных микросхем / А. С. Березин, О. Р. Мочалкина. – М. : Радио и связь, 1992. – 320 с.

112. Осадчук В. С. Математична модель частотного перетворювача деформації на основі біполярно-польової структури / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1999. – № 6. – С. 82–88.

113. Осадчук В. С. Дослідження мембранних частотних перетворювачів тиску / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2001. – № 1. – С. 75–80.

114. Потемкин В. Г. Система инженерных и научных расчетов Matlab 5. x: в 2 т. Т. 1. / В. Г. Потемкин. – М. : Диалог-МИФИ, 1999. – 366 с.

115. Осадчук О. В. Дослідження магнітного перетворювача на основі польової транзисторної структури з від'ємним опором / О. В. Осадчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – № 4. – С. 76–80.

116. Осадчук О. В. Математична модель магнітного перетворювача на основі транзисторної структури з від'ємним опором / О. В. Осадчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – № 3. – С. 59–63.

117. Пат. № 40239 А України, МКИ G01R 33/06. Мікроелектронний пристрій для виміру магнітної індукції / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – № 2000106041; заявл. 26.10.2000; опубл. 16.07.2001, Бюл. № 6. – 2 с.

118. Полупроводниковые твердые схемы / А. А. Колосов [и др.]. – М. : Сов. радио, 1965. – 495 с.
119. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники / И. П. Степаненко. – М. : Высшая школа, 1980. – 423 с.
120. Пауль Р. Транзисторы. Физические основы и свойства / Р. Пауль. – М. : Сов. радио, 1973. – 504 с.
121. Осадчук В. С. Математична модель частотного магнітного перетворювача на основі польових транзисторів з керувальним р-п переходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – № 2. – С. 77–81.
122. Негатроника / С. А. Гаряинов, А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, Н. А. Филинук. – Новосибирск: Наука, 1995. – 320 с.
123. Криночкін Р. В. Вольт-амперна характеристика радіовимірювального оптичного перетворювача на основі двох МДН-транзисторів / Р. В. Криночкін, О. В. Осадчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 4. – С. 85–89.
124. Осадчук В. С. Радиоизмерительный преобразователь магнитного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2010. – № 3. – С. 76–78.
125. Осадчук О. В. Магніточутливий генератор на основі транзисторної структури з від'ємним опором / О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010): тези доповідей X міжнародної науково-технічної конференції. / Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2010. – С. 83.
126. Осадчук В. С. Радіовимірювальний перетворювач магнітної індукції з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010): тези доповідей X міжнародної науково-технічної конференції. / Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2010. – С. 64.
127. Датчики фирмы MOTOROLA. Обзор продукции фирмы MOTOROLA. – М. : ОДЭКА, 1998. – 75 с.
128. Осадчук В. С. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. Г. Вербицький. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001. – 196 с.
129. Осадчук В. С. Методы построения микроэлектронных радиоизмерительных преобразователей с частотным принципом работы /

В. С. Осадчук, А. В. Осадчук // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2004. – № 3. – С. 26–33.

130. Osadchuk V. S. The Magneticreactive Effect in Transistors for Construction Transducers of Magnetic Field / V. S. Osadchuk, A. V. Osadchuk // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija. – 2011. – № 3(109). – P. 119–122.

131. Osadchuk V. S. The Microelectronic Radiomeasuring Transducers of Magnetic Field with a Frequency Output / V. S. Osadchuk, A. V. Osadchuk // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija. – 2011. – № 4(110). – P. 67–70.

132. Огляд магнітних сенсорів на основі магнітодіодного ефекту / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, О. П. Стівбчата. // Матеріали за 7-а міжнародна научна практична конференція, «Будешите изледвания», (17.02–25.02.2011.). – Софія.: Бял ГРАД БГ, 2011. – Т. 15. – С. 28–32.

133. Сенсори магнітного поля на основі біполярних транзисторів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, О. П. Стівбчата. // Veda a technologie: Krok Do Budoucnosti – 2011: Materialy VII Mezinarodni Vedecko-Prakticka Konference: (27.02.–05.03.2011). – Praha: Publishing House “Education and Science”, 2011. – Dil 17. – P. 54-60.

134. Осадчук В. С. Сенсори магнітного поля на основі польових транзисторів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, О. П. Стівбчата. // Naukowa Mysl Informacyjnej Powieki–2011: Materialy VII Miedzynarodowej Naukowi-Praktycznej Konferencji: (07–15 marca 2011). – Przemysl: Nauka i studia. – V. 15. – P. 38–42.

135. Гаврилов О. Т. Перспективы использования многослойных гетероструктур AlAs/GaAs в электронике СВЧ / О. Т. Гаврилов, И. И. Квяткевич, Ю. А. Матвеев // 8-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – 1998. – Т. 1. – С.81–84.

136. Осадчук В. С. Напівпровідникові прилади з від'ємним опором: навчальний посібник / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 162 с.

137. K. Yhland. A Symmetrical HFET/MESFET Model Suitable for Intermodulation analysis of Amplifiers and Resistive FET Mixers / K. Yhland, N. Rorsman, M. Garcia, H. Merkel // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – Jan., 2000. – V. 48. – P. 15.



138. Разевиг В. Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 2. Модели компонент аналоговых устройств / В. Д. Разевиг. – М. : Радио и связь, 1992. – 72 с.

139. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О. В. Осадчук. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2000. – 303 с.

140. Осадчук О. В. Мікроелектронний частотний магнітний перетворювач з активним індуктивним елементом / О. В. Осадчук // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Автоматика, вимірювання та керування. – 2001. – № 420. – С. 66–72.

141. Каяцкас А. А. Основы радиоэлектроники / А. А. Каяцкас. – М. : Высшая школа, 1988. – 464 с.

142. Электрические измерения / под ред. Е. Г. Шрамкова. – М. : Высшая школа, 1972. – 518 с.

143. Новицкий П. В. Цифровые приборы с частотными датчиками / П. В. Новицкий, В. Г. Кноринг, В. С. Гутников. – Л.: Энергия, 1970. – 424 с.

144. Осадчук В. С. Радіовимірювальний перетворювач магнітного поля на основі сенсора Холла / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4. – С. 179–182.

145. Ємнісний активний елемент на польовій транзисторній структурі з від'ємним опором / О. В. Осадчук, А. О. Семенов, О. О. Лазарєв, К. О. Коваль // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2011. – № 4. Режим доступу: [http://www.nbuuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2011\\_4](http://www.nbuuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2011_4)

146. Осадчук О. В. Багаточастотний генератор на основі ємнісного ефекту польової транзисторної структури з від'ємним опором / О. В. Осадчук, А. О. Семенов, К. О. Коваль // Наукові праці ВНТУ. – 2011. – № 2. – С. 1–10. Режим доступу: [http://www.nbuuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2011\\_2/2011-2.files/uk/11avownr\\_ua.pdf](http://www.nbuuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2011_2/2011-2.files/uk/11avownr_ua.pdf)

147. Осадчук О. В. Магнітний мікроелектронний частотний перетворювач / О. В. Осадчук, Я. О. Осадчук. // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах ВКДТС-2011: збірник тез доповідей Міжнародної конференції. / Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2011. – С. 64.

148. Осадчук О. В. Метод змінних станів для створення математичних моделей радіовимірювальних приладів в екології / О. В. Осадчук, М. В. Деундяк // III Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю «Екологія–2011»: збірник наукових статей. – Вінниця, 2011. – Т. 2. – С. 387–390.

149. Патент на корисну модель № 62366 Україна, МПК G01 R 33/06. Сенсор магнітного поля з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Стівбчата. – № u201101294; заяв. 07.02.2011; опубл. 25.08.11, Бюл. № 16. – 4 с.

150. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х кн. Кн.1 / С. Зи. – М. : Мир, 1984. – 456 с.

151. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника / Л. Росадо. – М. : Высшая школа, 1991. – 351 с.

152. Осадчук В. С. Магнитореактивный эффект в транзисторных структурах / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2011): матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця, 2011. – С. 132–133.

153. Патент на корисну модель № 61609 Україна, МПК G01 R 33/00. Вимірювач магнітної індукції. / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Стівбчата. – № u201015633; заяв. 24.12.2010; опубл. 25.07.11, Бюл. № 14. – 5 с.

154. Патент на корисну модель № 62367 Україна, МПК G01 R 33/06. Вимірювач магнітного поля з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Стівбчата. – № u201101298; заяв. 07.02.2011; опубл. 25.08.11, Бюл. № 16. – 5 с.

155. Семенов А. О. Аналіз чутливості фазового кута коефіцієнта відбиття хвилевідної вимірювальної комірки у випадку слабкопоглинаючого діелектрика / А. О. Семенов, О. О. Семенова, В. В. Чухов. // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2011. – № 45. – С. 130–139.

156. Осадчук В. С. Визначення вольт-амперної характеристики оптичного перетворювача на основі МДН-транзисторної структури з від'ємним опором та активним індуктивним елементом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 3. – С. 166–171.

157. Осадчук В. С. Визначення розподілу концентрації інжектіваних носіїв заряду при дії магнітного поля в біполярному транзисторі / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2011): матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця, 2011. – С. 134–135.

158. Осадчук В. С. Розподіл концентрації інжектіваних носіїв заряду в базовій області при дії магнітного поля в біполярних магніточутливих структурах / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. // Наукові праці ВНТУ, 2011. № 3. – С. 1–6. Режим доступу: [http://www.nbuiv.gov.ua/e-journals/VNTU/2011\\_3/2011-3\\_files/uk/11vsobms\\_ua.pdf](http://www.nbuiv.gov.ua/e-journals/VNTU/2011_3/2011-3_files/uk/11vsobms_ua.pdf)

159. Осадчук В. С. Дослідження магнітного частотного перетворювача на основі планарного біполярного і польового транзисторів з від'ємним опором / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – № 1. – С. 80–85.

160. Осадчук О. В. Дослідження стабілізованих генераторів на основі біполярних транзисторних структур з від'ємним опором / О. В. Осадчук, А. О. Семенов, К. О. Коваль // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2011): матеріали V МНТК, – Вінниця: ВНТУ, 2011. – С. 81–82.

161. Пат. № 41013 А Україна, МКИ Н01L 29/82. Мікроелектронний вимірювач магнітної індукції / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – № 2001010065; заявл. 03.01.2001; опубл. 15.08.2001. Бюл. № 7. – 5 с.

162. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором: монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов, К. О. Коваль. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 336 с.

163. Дослідження повного опору магніточутливого тиристора / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, О. П. Стівбчата // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2011. – № 1. – С. 107–110.

164. Осадчук В. С. Рекомендації по проектуванню мікроелектронних перетворювачів магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах ВКДТС-2011: тези доповідей Міжнародної конференції. – Вінниця. – С. 63.

165. Осадчук В. С. Радиоизмерительный преобразователь магнитного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2010. – № 3. – С. 76–78.

166. Осадчук В. С. Перетворювач магнітного поля з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Стобчата // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2011. – № 5. – С. 149–154.

167. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: в 3 т. Т. 1. / за ред. З. Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2003. – 504 с.

168. Мікроелектронні сигнальні перетворювачі теплових сенсорів потоку: монографія / [З. Ю. Готра, С. В. Павлов, О. В. Осадчук та ін.]. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 240 с.

169. Осадчук В. С. Перетворювач магнітного поля з частотним виходом // В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Стобчата // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 5. – С. 149–154.

170. Осадчук В. С. Перетворювач магнітного поля з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Стобчата // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 6. – С. 32–37.

171. Мікроелектронний перетворювач магнітної індукції з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, О. П. Стобчата // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 5. – С. 157–163.

172. Осадчук В. С. Частотний перетворювач магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Спецвипуск. – 2006. – С. 209–212.

173. Osadchuk V. S. The Microelectronic Radiomeasuring Transducers of Magnetic Field with a Frequency Output / V. S. Osadchuk, A. V. Osadchuk // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija. – 2011. – № 4(110). – P. 67–70.

174. Патент № 77810 України, МКИ H01 L 29/82. Мікроелектронний сенсор для виміру магнітної індукції / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук; опубл. 15.01.2007. – Бюл. № 1. – 4 с.

175. Пат. № 78318 України, МКИ H01 L 29/82. Магнітний сенсор з активним індуктивним елементом. / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет; опубл. 15.03.2007, Бюл. № 3.

176. Патент № 78565 України, МПК H01 L 43/06, G01R 33/06. Сенсор магнітної індукції / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 7 – 5 с.

177. Патент № 80906 України, МПК H01 L 43/06, G01R 33/06. Мікроелектронний вимірювач магнітної індукції з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук; опубл. 12.11.2007, Бюл. № 18.

178. Osadchuk V. S. The Frequency Transducer of Magnetic Induction / V. S. Osadchuk, A. V. Osadchuk, V. V. Chabanenko // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija. – 2007. – № 3(75). – P. 57–60.

179. Осадчук В. С. Мікроелектронний частотний перетворювач магнітного поля з активним індуктивним елементом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 2. – С. 92–96.

180. Осадчук В. С. Вольт-амперна характеристика перетворювача магнітного поля з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Стовбчата // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2011. – № 2. – С. 96–101.

181. Осадчук В. С. Оптичний частотний перетворювач на основі сонячної батареї та транзисторних структур з від'ємним опором / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 6. – С. 251–257.

182. Осадчук О. В. Визначення метрологічних характеристик автогенераторного засобу з від'ємним опором для дослідження твердофазних систем / О. В. Осадчук, С. В. Барабан, А. О. Семенов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – № 1. – С. 54–58.

183. Осадчук О. В. Метод вхідного контролю структурно-чутливих параметрів некристалічних напівпровідників / О. В. Осадчук, С. В. Барабан, А. О. Семенов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 3. – С. 90–93.

184. Осадчук О. В. Підвищення вірогідності неруйнівного контролю структурних перетворень некристалічних напівпровідників / О. В. Осадчук, А. О. Семенов, С. В. Барабан // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 2012. – № 2. – С. 79–82.

185. Осадчук О. В. Система вхідного контролю некристалічних напівпровідників на основі автогенераторних приладів з від'ємним опором / О. В. Осадчук, А. О. Семенов, С. В. Барабан // Нові технології. – 2011. – № 4(34) – С. 9–13.

186. Осадчук О. В. Метод вхідного контролю структурно-чутливих параметрів некристалічних напівпровідників / О. В. Осадчук, А. О. Семенов, С. В. Барабан // Вісник Хмельницького національного університету. Серія Технічні науки. – 2012. – № 3. – С. 90–93.

187. Елементи змінної ємності на транзисторних структурах з від'ємним опором та С-негатронах / К. О. Коваль, О. О. Лазарєв, А. О. Семенов, Л. І. Вершинін // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2012»: матеріали міжнародної молодіжної науково-технічної конференції. – Севастополь, 2012. – С. 423.

188. Пат. № 41665 А Україна, МКИ H03C 7/00. Мікроелектронний генератор електричних коливань / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – № 2001010067; заявл. 03.01.2001; опубл. 17.09.2001, Бюл. № 8. – 2 с.

189. Пат. № 2086048 Российская Федерация, МКИ H01L 31/16. Полупроводниковый магнитооптический преобразователь / В. С. Осадчук, Е. В. Осадчук, А. В. Осадчук. – № 94028632; заявл. 29.08.1994; опубл. 27.07.1997, Бюл. № 21. – 3 с.

190. Пат. № 2068568 Российская Федерация, МКИ G01R 33/06. Полупроводниковый датчик магнитного поля / В. С. Осадчук, Е. В. Осадчук, А. В. Осадчук. – № 92004093; заявл. 16.10.1992; опубл. 27.10.1996, Бюл. № 30. – 3 с.

191. Осадчук В. С. Дослідження частотного перетворювача магнітної індукції на основі двох біполярних транзисторів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – № 6. – С. 111–112.

192. Осадчук О. В. Магнітний частотний сенсор / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – Т. 1 (68), Ч. 1, № 4. – С. 128–131.

193. Осадчук А. В. Магнитоуправляемый генератор сверхвысоких частот /, А. В. Осадчук, В. С. Осадчук // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМикро-2005): материалы 15-й Международной Крымской конференции. – Севастополь: Вебер, 2005. – Т. 2. – С. 449–450. ISBN 966-7968-79-0.

194. Осадчук В. С. Сенсор магнітного поля на основі двоколекторного магнітотранзистора / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2006. – № 1(11). – С. 160–164.

195. Osadchuk V. S. Radiomeasurement Transducer to Magnetic Induction with Frequency Output / V. S. Osadchuk, A. V. Osadchuk // The International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunication and Computer Science" TCSET 2006. – Lviv–Slavske, 2006. – P. 490–492.

196. Осадчук В. С. Дослідження мікроелектронного частотного перетворювача магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2006. – Том 1, № 2. – С. 139–143.

197. Осадчук В. С. Дослідження залежності повного опору двоколекторного магнітотранзистора від магнітної індукції / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк // Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПМРТП-2006): матеріали другої МНТК. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – С. 127–128.

198. Осадчук О. В. Мікроелектронний частотний магнітний перетворювач з активним індуктивним елементом / О. В. Осадчук // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Автоматика, вимірювання та керування. – 2001. – № 420. – С. 66–72.

199. Осадчук В. С. Напівпровідникові перетворювачі інформації / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця: ВНТУ, 2004. – 208 с.

200. Осадчук В. С. Мікроелектронний частотний перетворювач магнітної індукції із елементом Холла / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – Т. 1, № 2. – С. 208–211.

201. Osadchuk V. S. The Frequency Transducer of the Magnetic Field on the Basis of Jet Properties of Transistor Structure with Negative Resistance / V. S. Osadchuk, A. V. Osadchuk, E. Koenig // International Conference "Robotics and Applications and Telematics RA-2007", 29–31.08.2007. – Würzburg, Germany, 2007. – V. 586–035. P. 1–5.

202. Osadchuk V. S. Microelectronic frequency transducers for a monitoring of a surrounding medium / V. S. Osadchuk, A. V. Osadchuk // International Innovation Conference 2007, "Innovation & Health and Safe Hu-

man Environment". 29–30 November 2007, SANU, Belgrade, Serbia. BAI2007E003. – P. 1–10.

203. Ферри Д. Электроника ультрабольших интегральных схем / Д. Ферри, Л. Эйкерс, Э. Гринич; пер. с англ. Е. З. Мазеля. – М. : Мир, 1991. – 327 с.

204. PSPICE User's guide / MicroSim Corporation. La Cadena Drive, Laguna Hills, 1989. – 450 p.

205. Осадчук О. В. Аналіз сучасного стану напівпровідникових магнітних сенсорів / О. В. Осадчук, М. О. Притула, К. О. Коваль // Materialy IV mezinarodni vedecko-prakticka konference "Vedecky prumysl evropskeho kontinentu–2007". – Praha: Education and Seince– P. 57–63.

206. Осадчук В. С. Частотний перетворювач магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, М. О. Притула // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2008): матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – К., 2008. – С. 206–208.

207. Разевиг В. Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 3. Моделирование аналоговых устройств / В. Д. Разевиг. – М. : Радио и связь, 1992. – 120 с.

208. Осадчук О. В. Математична модель автогенераторного засобу для визначення фазових перетворень твердих матеріалів / О. В. Осадчук, С. В. Барабан, А. О. Семенов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 1. – С. 120–125.

209. Осадчук О. В. Математична модель радіовимірювального приладу з оптико-частотним перетворювачем на основі біполярної транзисторної структури / О. В. Осадчук, В. П. Деундяк, М. В. Деундяк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 2. – С. 196–201.

210. Osadchuk V. S. The Microelectronic Transducers of Pressure with the Frequency Output / V. S. Osadchuk, A. V. Osadchuk // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2012. – № 5(121). – P. 105–108.

211. Осадчук О. В. Математична модель оптико-частотного сенсора концентрації газу / О. В. Осадчук, Д. П. Дудник // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012): тези доповідей XI Міжнародної конф. – Вінниця. – С. 79.



212. Осадчук В. С. Радіовимірювальні мікроелектронні перетворювачі витрат газу з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Ю. А. Ющенко. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 140 с.

213. Осадчук В. С. Рекомендації по проектуванню радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 5. – С. 137–142.

214. Осадчук В. С. Рекомендації по проектуванню радіовимірювальних магніточутливих перетворювачів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПТТП-2005): матеріали першої МНТК. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – С. 83.

215. Анализ измерительных информационных систем / [В. Т. Маликов, В. М. Дубовой, Р. Н. Кветный, П. Р. Исмагуллаев]. – Ташкент: Фан, 1984. – 176 с.

216. Кузьмин И. В. Оценка эффективности и оптимизации АКСУ. – М. : Советское радио, 1971. – 294 с.

217. Байковский В. М. Некоторые аспекты информационного обеспечения управления новой техникой / В. М. Байковский, Т. В. Кошуба // Методические материалы по подготовке докладов о важнейших достижениях приборостроения. – М. : из-во ЦНИИТЭИ приборостроения. – 1977. – С. 1–38.

218. Kleinpenning T. G. M. Comment on Transverse  $1/f$  noise in InSb thin films and the SNR of related Hall elements / T. G. M. Kleinpenning, I. K. J. Vandamme // J. Appl Phys. – 1979. – V. 50. – P. 5547.

219. Kleinpenning T. G. M. Disign of an ac micro-gauss sensor / T. G. M. Kleinpenning // Sensor and Actuators. – 1983. – V. 4. – P. 3–9.

220. Валитов Р. А. Радиотехнические измерения / Р. А. Валитов, В. Н. Сретинский. – М. : Советское радио, 1970. – 711 с.

221. Аронов В. Л. Испытания и исследование полупроводниковых приборов / В. Л. Аронов, Я. А. Федотов. – М. : Высшая школа, 1975. – 324 с.

222. Кухарчук В. В. Елементи теорії контролю динамічних параметрів електричних машин / В. В. Кухарчук. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 125 с.

223. Кухарчук В. В. Моделювання контролю залежності пускового моменту в функції кутового положення ротора / В. В. Кухарчук,

А. В. Козловський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – № 1. – С. 17–23.

224. Кухарчук В. В. Аналіз та практична реалізація мікропроцесорного засобу вимірювання кутової швидкості обертання електричних машин / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1995. – № 2. – С. 12–16.

225. Осадчук В. С. Аналіз конструкцій та класифікація польових магніточутливих елементів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 3. – С. 75–79.

226. Патент на корисну модель № 66286 Україна, МПК G01 R 33/06. Мікроелектронний вимірювач магнітного поля з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Т. В. Процюк. – № u201107989; заяв. 24.06.2011; опубл. 26.12.11. – Бюл. № 24. – 5 с.

227. Патент на корисну модель № 66031 Україна, МПК H01 L 43/00. Вимірювач магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Стовбчата. – № u201105554; заяв. 04.05.2011; опубл. 26.12.11, Бюл. № 24. – 5 с.

228. Патент на корисну модель № 66947 Україна, МПК H01 L 21/66. Мікроелектронний чотиризондовий пристрій для вимірювання напівпровідникового опору / О. В. Осадчук, Ю. І. Нікешин. – № u201108127; заяв. 29.06.2011; опубл. 25.01.12, Бюл. № 2. – 6 с.

229. Патент на корисну модель № 68937 Україна, МПК H01 L 21/66. Мікроелектронний шестизондовий пристрій для вимірювання напівпровідникового опору / О. В. Осадчук, Ю. І. Нікешин. – № u201114320; заяв. 05.12.2011; опубл. 10.04.12, Бюл. № 7. – 6 с.

230. Патент на корисну модель № 70192 Україна, МПК H01 L 29/82, G01R 33/06. Мікроелектронний вимірювач магнітної індукції / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська. – № u201115372; заяв. 26.12.2011; опубл. 25.05.12, Бюл. № 10. – 6 с.

231. Патент на корисну модель № 70967 Україна, МПК H01 L 29/82, G01R 33/06. Вимірювач магнітної індукції з активним індуктивним елементом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, Ю. А. Ющенко. – № u201200228; заяв. 06.01.2012; опубл. 25.06.12, Бюл. № 12. – 6 с.

232. Патент на корисну модель № 70968 Україна, МПК H01 L 29/82, G01R 33/06. Мікроелектронний сенсор магнітної індукції /

В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, Ю. А. Ющенко. – № u201200229; заяв. 06.01.2012; опубл. 25.06.12, Бюл. № 12. – 6 с.

233. Патент на корисну модель № 71878 Україна, МПК H01 L 29/82, G01R 33/06. Мікроелектронний частотний сенсор магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська. – № u201201478; заяв. 13.02.2012; опубл. 25.07.12, Бюл. № 14. – 6 с.

234. Патент на корисну модель № 71950 Україна, МПК G01B 11/00. Спосіб для визначення відстаней переміщення / Ю. С. Кравченко, В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. С. Радчук. – № u201203216; заяв. 19.03.2012; опубл. 25.07.12, Бюл. № 14. – 6 с.

235. Патент на корисну модель № 72254 України, МПК H01 L 29/82, G01R 33/06. Частотний вимірювач магнітної індукції / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська. – № u201201530; заяв. 13.02.2012; опубл. 10.08.12, Бюл. № 15. – 7 с.

236. Патент на корисну модель № 72255 України, МПК H01 L 29/82, G01R 33/06. Сенсор магнітного поля з активним індуктивним елементом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська. – № u201201531; заяв. 13.02.2012; опубл. 10.08.12, Бюл. № 15. – 7 с.

*Наукове видання*

**Осадчук Володимир Степанович  
Осадчук Олександр Володимирович**

**МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ  
З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ**

Монографія

Редактор С. А. Малішевська

Оригінал–макет підготовлено О. В. Осадчуком

Підписано до друку 11.06.2013 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 15,25  
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) Зам № 06-02

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.  
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.