

ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН ГАЛЬВАНОМАГНІТНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

к.ф.-м.н., ст. викл.

Пилипенко О.В.

Гальваноманітні перетворювачі

- базуються на фізичних ефектах, що виникають у поміщених в магнітне поле твердих тілах при русі в них заряджених частинок: ефект Холла (виникнення поперечної різниці потенціалів на бічних гранях пластини при проходженні електричного струму в поперечному до нього магнітному полі) та ефект Гауса (зміна електричного опору напівпровідника під дією магнітного поля).
- Магніторезистори умовно поділяють на монолітні і плівкові.
- Монолітний магніторезистор являє собою підкладку з розміщеним на ній магніточутливим елементом, опір якого збільшується при дії магнітного поля за рахунок ефекту Гауса. Такі магніточутливі елементи виготовляються з напівпровідникових матеріалів із високою рухливістю носіїв заряду: антимоніду індію (InSb) та його сполук, арсеніду індію (InAs) та ін [3]. Принциповий вигляд монолітного магніторезистора показаний на рис. 1, а, б. При такій конструктивній формі шляхом зміни геометричних параметрів та матеріалу меандра можна змінювати початковий опір магніторезистора в широких межах [4].

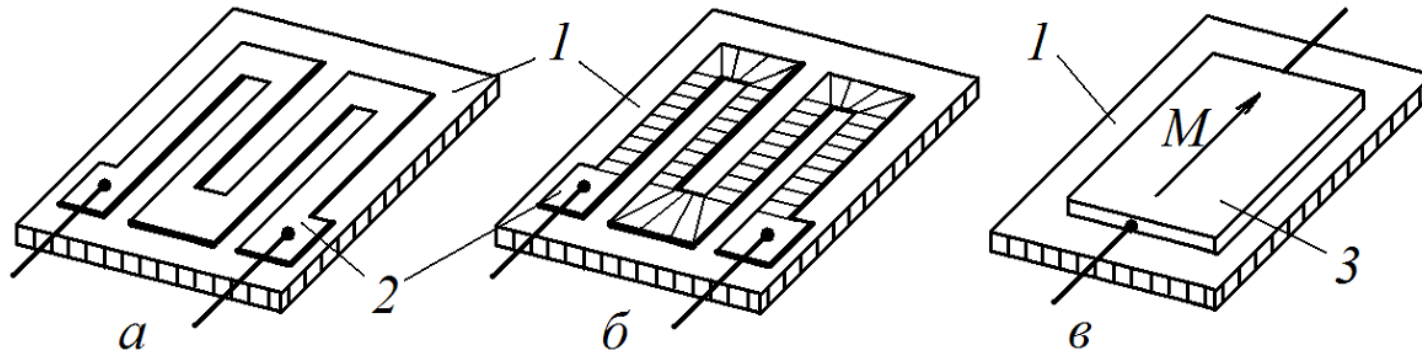


Рис. 1 – Конструкція магніторезисторів: *а* – монолітний із напівпровідниковою пластиною у формі меандру, *б* – монолітний з поперечними провідними смугами на пластині, *в* – плівковий

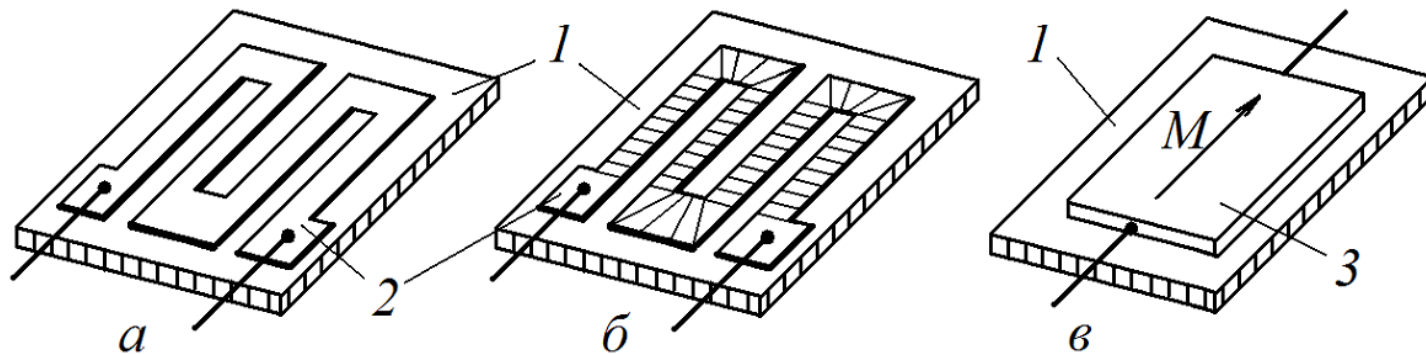
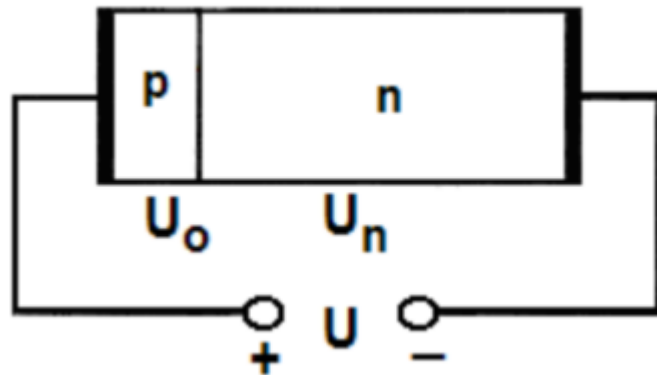


Рис. 1 – Конструкція магніторезисторів: *а* – монолітний із напівпровідниковою пластиною у формі меандру, *б* – монолітний з поперечними провідними смугами на пластині, *в* – плівковий

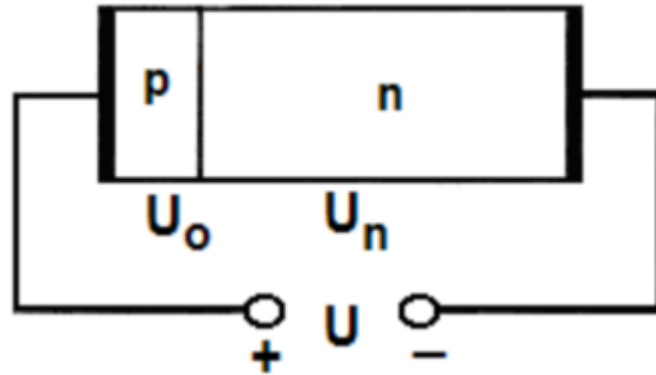
- На рис. 1 позначено: 1 – підкладка, 2 – напівпровідниковий магніточутливий елемент, 3 – феромагнітна плівка, *M* – головний напрям вектора намагніченості. Магніточутливий елемент плівкових приладів (рис. 1, *в*) виготовлений з феромагнітних плівок, що використовують анізотропний магніторезистивний ефект (АМР). Максимальне значення магнітоопору тонкоплівкових магніторезисторів відповідає нульовому зовнішньому магнітного поля, тобто при впливі магнітного поля опір такого магніточутливого елемента зменшується [3]. На сьогодні такі сенсори пропонують провідні виробники сенсорної техніки: Philips, Honeywell, HL-Planartechник і т.д. Для лінеаризації функції перетворення плівкових магніторезисторів широко використовують чутливі елементи, які складаються із магніторезистивних плівок пермалою, осаджених на кремнієву пластину у вигляді смужок [8,9].

- Під **магнітодіодним** ефектом розуміють різку зміну електричного опору напівпровідникового діода з довгою базою, увімкненого в прямому напрямку, у результаті дії на діод поперечного магнітного поля [1]. Для пояснення цього ефекту розглянемо явища, що виникають у діоді, зображеному на рис. 1.



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 n-області, тобто n-область є більш високоомною, ніж р-область.

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



- При дії поперечного магнітного поля на діод (рис.), через який протікає достатньо великий прямий струм, дифузійна довжина інжекттованих 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 $U_0 + U_n = const$. 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).

- Магнітодіод, конструкція якого представлена на рис. 2. 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 виді рівнобедреного трикутника з вершиною, спрямованою в глибину бази магнітодіода. Зменшення рухливості носіїв заряду відбувається за рахунок накладення магнітного поля, що викликає збільшення опору бази з відповідним перерозподілом прикладеного до діода напруги між р-п-переходом і товщею бази. При цьому зменшення напруги на р-п-переході сприяє зменшенню інжекції, тобто концентрації інжектованих у базу носіїв і, їхнього часу життя. Що приводить до нового збільшення опору бази і зменшенню струму через діод (тобто підвищенню напруги на діоді при заданому струмі через нього).

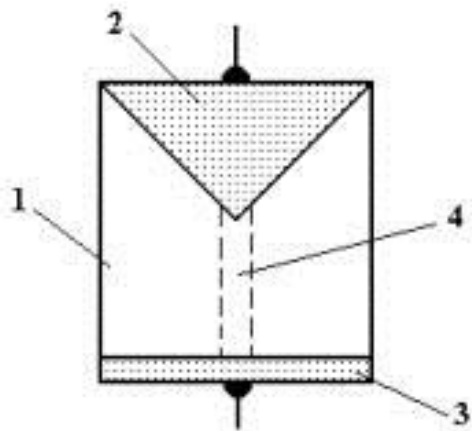


Рис. 2. Конструкція магнітодіода: 1 – пластина з напівпровідникового матеріалу (кремній, германій, арсенід галію); 2, 3 – контакти; 4 – шнур високої густини струму

- На рис. 3 приведена одна із структур інтегрального магнітодіода, виготовленого з використанням типової МОН технології. Область емітера 1 і контакт до колектора 2 магнітодіода реалізовані на основі n^+ областей стоку-витоку n МОП транзистора, базова область 3 формується на основі дифузійної області кишень p -типу, контакт до базової області 4 – на основі p^+ областей стоку-витоку p МОН транзистора, колектором є підкладка n -типу. В даній конструкції межа розділу оксид-кремній 5 грає роль поверхні з низкою швидкістю рекомбінації, а зворотно зміщений p - n -перехід база-колектор – роль поверхні з високою швидкістю рекомбінації носіїв заряду.

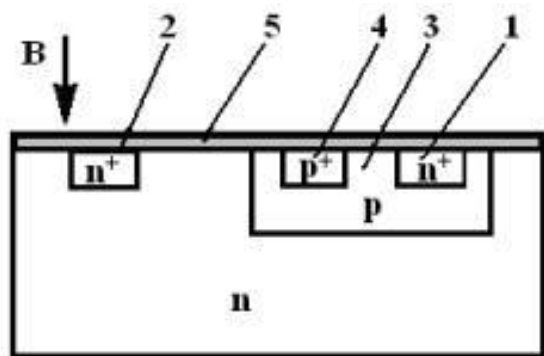
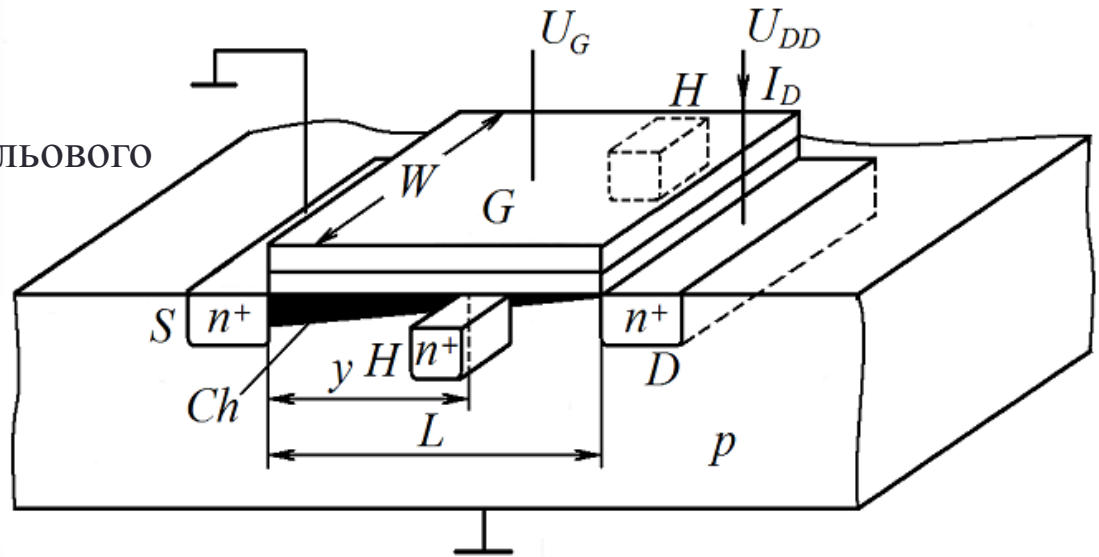


Рис. 3. Структура магнітодіода з використанням типової МОН технології

- **Елемент Холла** (ЕХ) являє собою пластину з напівпровідникового матеріалу, з чотирьох сторін якої розташовані контакти. Конструктивно перетворювачі Холла можуть бути виконані як у вигляді дискретних елементів, так і у вигляді напівпровідникових структур, розташованих в кристалі напівпровідникового матеріалу, в тому числі і разом з електронною схемою підсилення і обробки сигналу ЕХ [3].

Рис. 4 – Принципова структура польового МОН-елемента Холла



Польовий МОН-елемент Холла (див. рис. 4) відрізняється від звичайного тим, що у звичайному ЕХ носії заряду забезпечуються самим матеріалом, а у МОН-приладі вони генеруються завдяки поверхневому ефекту поля. Напряга Холла в польовому елементі значно залежить від місця розташування холлівських контактів. Це пояснюється тим, що поле Холла при зменшенні концентрації носіїв заряду збільшується.

Суттєвим **недоліком** таких датчиків є значна температурна залежність ЕРС Холла, висока залишкова напруга.

- **Магнітодіод** (МД) – напівпровідниковий прилад з $p-n$ переходом і невідпрямляючими контактами, між якими знаходиться область високоомного напівпровідника.

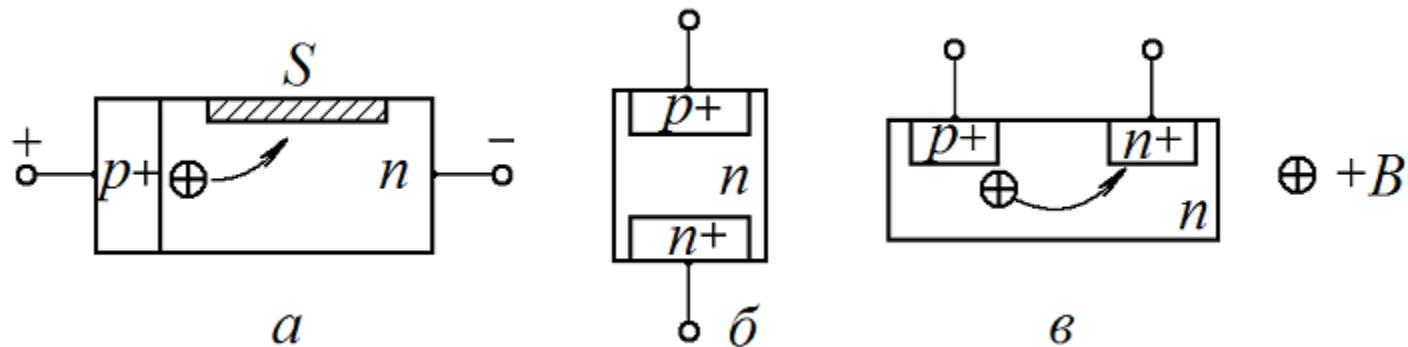


Рис. 5 – Принципова структура магнітодіодів: а – з областю високої швидкості рекомбінації, б – торцева структура, в – планарна структура

Відмінність від звичайних напівпровідникових діодів полягає в тому, що МД (рис. 5, а, б, в) виготовляється з високоомного напівпровідникового матеріалу, провідність якого близька до власної, ширина бази d у кілька разів більша за дифузійну довжину пробігу носіїв L [1]. Перевагою МД є висока питома магнітна чутливість при низьких напругах джерела живлення. Таким чином, ефект магнітоопору за рахунок зміни рівня інжекції підсилюється в сотні разів.

- **Магнітотранзистор (МТ)** – це транзистор, структура та параметри якого оптимізовані для отримання магнітної чутливості їх колекторних струмів. Дія магнітного поля на звичайні біполярні транзистори виявляється у викривленні траєкторії інжектованих із емітера носіїв заряду, що приводить до збільшення ефективної довжини бази та відхилення частини носіїв від колектора [2]. Роль станнього ефекту збільшується зі зменшенням ширини емітера та колектора, що забезпечує збільшення магніточутливості. Тому латеральна конструкція виявляє найбільшу магніточутливість. На рис. 6 зображена структура такого магнітотранзистора; пунктиром показана область об’ємного заряду колекторного р – n переходу.

На рис. 6 лінії із стрілками указують напрям руху носіїв заряду: верхня – в магнітному полі $B \oplus$, нижня – в полі $B \ominus$, середня лінія – при $0 = B$.

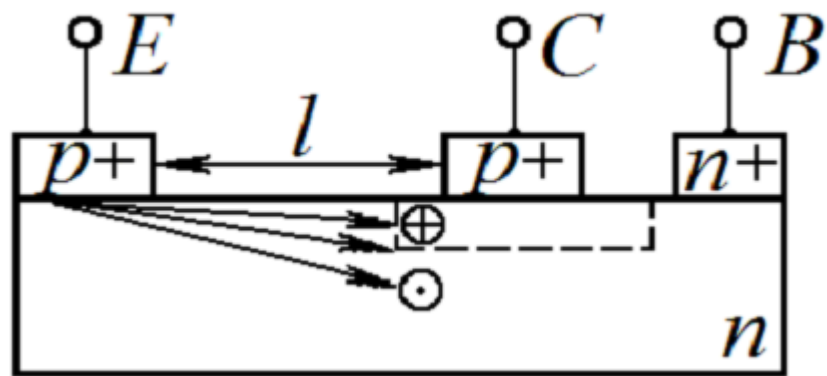


Рис. 6 – Структура біполярного однокolleкторного магнітотранзистора

Двоколекторні магнітотранзистори

- (ДКМТ) характеризуються лінійною залежністю вихідного сигналу від напруженості магнітного поля в широкому діапазоні значень магнітної індукції, чутливістю до напрямку магнітного поля і високою реальною чутливістю, оскільки ДКМТ є балансними приладами. При тих самих робочих струмах чутливість двоколекторних магнітотранзисторів на два-три порядки вища, ніж чутливість сенсорів Холла. Висока чутливість і лінійність характеристики при малих магнітних полях дозволяють використовувати магнітотранзистори як сенсори слабких магнітних полів (відтворюючі магнітні голівки, електронні компаси і т.д.). У великих магнітних полях чутливість зменшується за рахунок того, що всі носії вже перерозподілені, і напруга. Біполярні магнітотранзистори мають великі значення керуючих струмів, високий рівень шумів

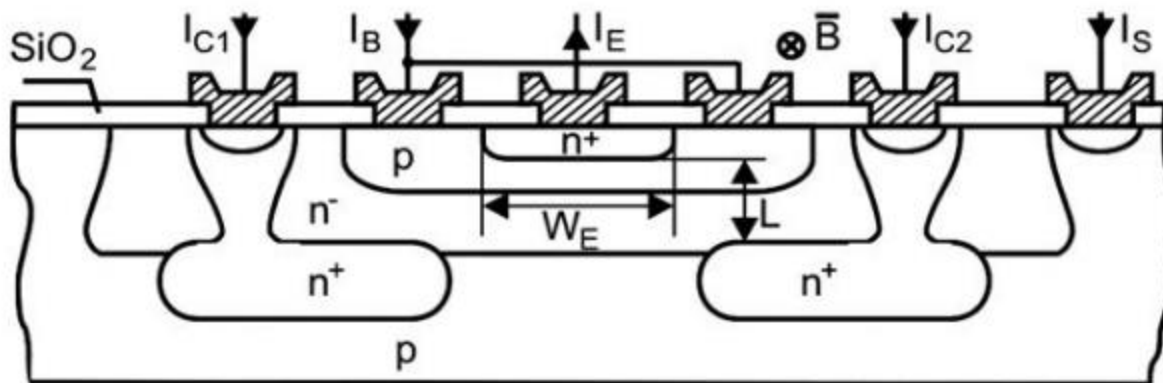


Рис 7 - Будова двоколекторного магнітотранзистора

Магніточутливі польові транзистори (МПТ)

- Принципова структура двостокового магніточутливого польового транзистора зображена на рис. 8. Транзистор має два стоки, D_1 та D_2 , які розташовані один біля одного та розділені ізолятором, тому струм витoku S розділяється між обома стоками рівномірно. При дії зовнішнього магнітного поля перпендикулярно до поверхні транзистора носії заряду під дією сили Лоренца відхиляються в бік одного зі стоків (залежно від напрямку складової індукції B_z), внаслідок чого струм одного стоку збільшується, а іншого – зменшується.

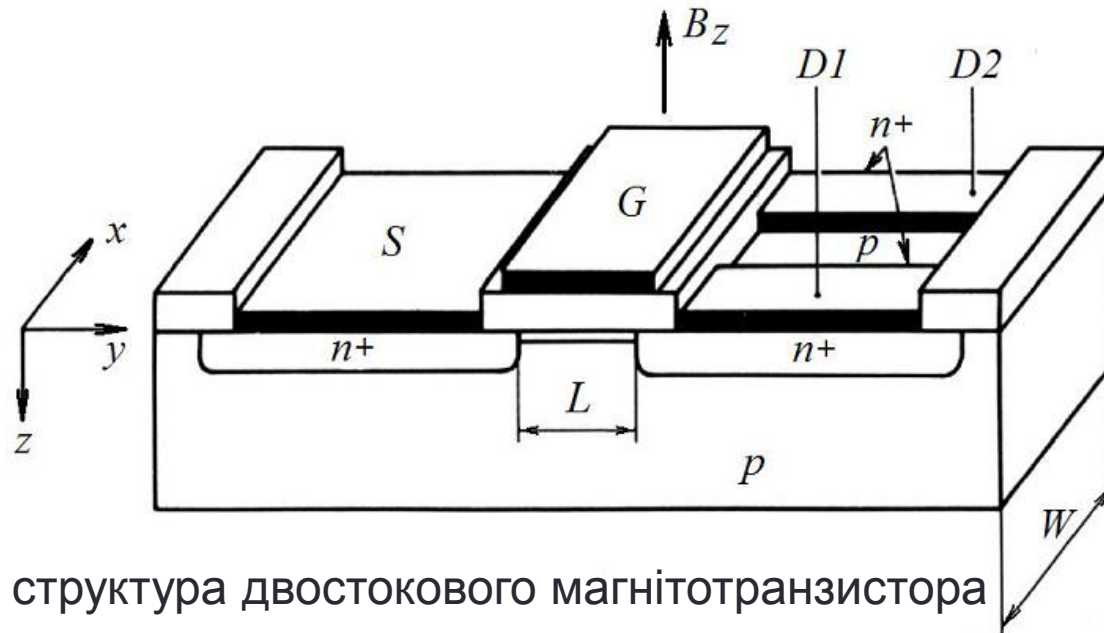


Рис. 8 – Принципова структура двостокового магнітотранзистора

До **недоліків** польових магнітотранзисторів відносять температурну залежність опору каналу, однак такі вимірювачі характеризуються також низьким рівнем шумів, низькими керуючими струмами, високою швидкістю.

Гальваномагніторекомбінаційні (ГМР)

- перетворювачі базуються на зміні середньої концентрації носіїв заряду під дією магнітного поля, що проявляється в провідниках, які мають поверхні з різною швидкістю рекомбінації носіїв зарядів.

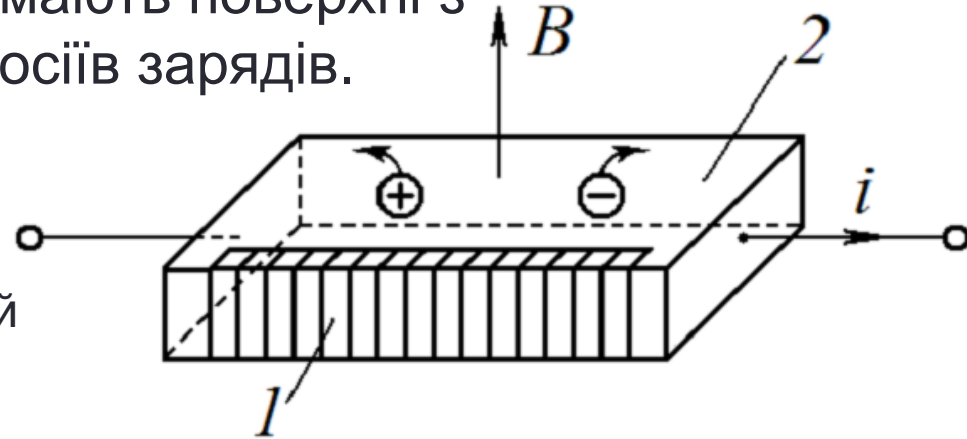


Рис. 9 – Гальваномагніторекомбінаційний перетворювач

На рис. 9 перетворювач являє собою тонку напівпровідникову пластину, у якій поверхня 1 погано оброблена, а поверхня 2 відполірована. Внаслідок цього біля поверхні 1 швидкість рекомбінації носіїв зарядів на 2-3 порядки більша, ніж біля поверхні 2. Якщо перетворювач знаходиться в магнітному полі так, що вектор магнітної індукції направлений перпендикулярно вектору густини струму і паралельно площинам, то під дією сила Лоренца відбувається відхилення носіїв заряду до однієї з бічних поверхонь, змінюється опір ГМР перетворювача. Основними недоліками цього типу приладів є вплив температури, шумів та контактів, складність виготовлення. ГМР перетворювачі використовуються для вимірювання індукції постійних та змінних магнітних полів, безконтактного вимірювання струму, малих переміщень тощо

Таблиця – Порівняння гальваномагнітних перетворювачів

Тип приладу	Нелінійність, %	Споживаний струм, мА	Діапазон робочих частот, Гц	Чутливість, В/Тл	Діапазон вимірювань, Тл
Магніто-резистори:	1	2,5	$0-10^2$	біля 0,1 (монолітні), 5-32(плівкові)	$10^{-2}-1$ (монол.), $10^{-10}-3 \cdot 10^{-2}$ (плівкові)
Елементи Холла	1	0,5	$0-10^6$	0,0056-6,4	$10^{-4}-2 \cdot 10^{-2}$
Магнітодіоди	0,5	1	$0-10^8$	до 30	$10^{-6}-1$
Біполярні магніто-транзистори	0,3	4-10	$0-10^9$	біля 40 (1колектор), до500(ДКМТ)	$10^{-6}-0,5$
Польові магніто-транзистори	0,3	$5 \cdot 10^{-7}-0,3$	$0-10^9$	до 400	$10^{-6}-0,5$
Магніто-тиристори та магніто-симістори	0,3	10	$0-10^5$	10-100	$10^{-5}-10$
ГМР перетворювачі	0,4	10	$0-10^4$	16-80	$5 \cdot 10^{-7}-1$

