

1.6 Сучасні напрями розвитку електроніки

1.6.1 Функціональна мікроелектроніка

Функціональна мікроелектроніка - це галузь електроніки, яка дозволяє реалізувати певну функцію апаратури без застосування стандартних базових елементів на основі фізичних явищ у твердих тілах. У цьому випадку локальному об'єму твердого тіла надаються такі властивості, які потрібні для виконання певної функції. Функціональні мікросхеми можуть виконуватися на основі не тільки напівпровідників, а й таких матеріалів, як надпровідники, сегнетоелектрики, фотоматеріали та ін. Для перероблення інформації можна використовувати явища, які не пов'язані з електропровідністю (наприклад, оптичні та магнітні явища в діелектриках, поширення ультразвуку та ін.).

1.6.2 Хемотроніка

Хемотроніка (іоніка) - розділ електроніки, змістом якого є теорія і практика електрохімічних перетворювачів для нових типів керуючих, інформаційних, обчислювальних і вимірювальних пристроїв. Першими електрохімічними приладами були гальванічні елементи й акумулятори, а потім електролітичні конденсатори, але усі вони звичайно не розглядаються в хемотроніці.

На початку розвитку хемотроніки були створені прилади, що є аналогами діодів і тріодів, але в них рухливими носіями заряду були іони в рідких електролітах, а не електрони. На основі цих приладів удалося здійснити випрямлення і посилення. Оскільки маса іонів у багато разів більше, а рухливість у багато разів менше, ніж маса і рухливість електронів, прилади хемотроніки дуже інерційні і придатні тільки для дуже низьких частот. Ця їх властивість є істотним недоліком. Але варто мати на увазі, що в багатьох системах, наприклад, пристроях автоматики, процеси проходять порівняно повільно й у цих випадках низькочастотність приладів хемотроніки не має значення.

Є багато різних приладів хемотроніки. Теорія таких приладів складна, тому що в них проходять дуже складні фізико-хімічні процеси. Далі будуть розглянуті найбільш типові прилади хемотроніки. Як правило, вони мають герметичний корпус, у якому є електроліт і електроди. Матеріали деяких електродів і корпуси не повинні вступати в хімічну взаємодію з електролітом. Значна частина приладів хемотроніки - це концентраційні електрохімічні перетворювачі або перетворювачі дифузійного типу. Робота цих приладів ґрунтується на зміні концентрації активних компонентів електроліту. Ці компоненти містяться в електроліті в двох видах: окисленому і відновленому. Крім того, в електроліті є ще і пасивний (індиферентний) компонент, що не бере участі в хімічних реакціях, а лише збільшує провідність електроліту. Розподіл активних компонентів залежить від декількох процесів, що проходять в електроліті: дифузії, конвекції та міграції.

Дифузія - це поширення іонів унаслідок різниці концентрацій. *Конвекція* - переміщення самого розчину за рахунок різниці густини. *Міграція* (аналог дрейфу носіїв заряду) - переміщення іонів під дією електричного поля або поля, створеного різницею потенціалів на електродах. Головну роль звичайно відіграє дифузія.

Найпростіший електрохімічний прилад - симетрична плоска електрохімічна комірка (рис. 1.33), має електроди однакової площі з того самого матеріалу. Вольт-амперна характеристика такої комірки також симетрична (рис. 1.34 а). У несиметричній комірці площі електродів різні і вольт-амперна характеристика несиметрична (рис. 1.34 б), а отже, така комірка має випрямні властивості. Можна одержати випрямний ефект і при однаковій площі електродів, якщо поділити весь обсяг електроліту на дві нерівні частини за допомогою дифузійного бар'єра. Таким бар'єром може бути пориста або суцільна перегородка з тонкою щілиною або капіляром, що з'єднує відсіки.

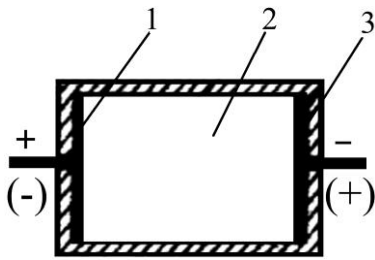


Рисунок 1.33 – Найпростіша електрохімічна комірка

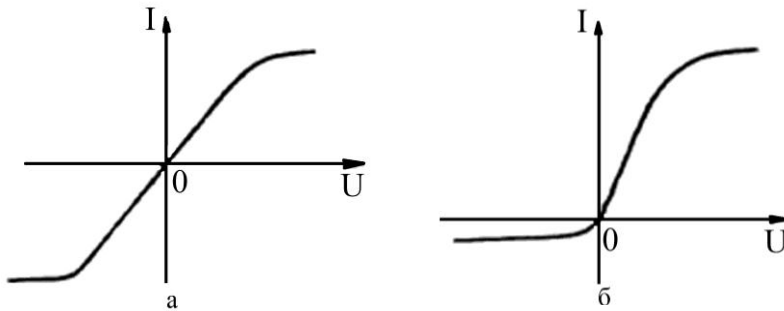


Рисунок 1.34 - Вольт-амперні характеристики симетричної (а) та несиметричної (б) електрохімічних комірок

Електрохімічні діоди мають відношення площ електродів до декількох сотень і такого ж порядку коефіцієнт випрямлення. На відміну від напівпровідникових електрохімічні діоди працюють уже при дуже низьких напругах від 0,005 до 0,050 В, можуть бути дуже малих розмірів, мають низький рівень власних шумів, прості у виготовленні, дешеві і мають високу надійність. Звичайно, вони придатні тільки для низьких та інфранизьких частот.

Хемотронні діоди з дифузійним бар'єром можуть застосовуватися як інтегратори струму, тобто лічильників кількості електрики. При протіканні струму змінюється концентрація компонентів електроліту і його колір. Тому можливе візуальне визначення кількості електрики, але погрішність складе не менше 10%. Якщо в діод увести додатковий електрод, то можна кількість електрики визначити за струмом в ланцюзі додаткового електрода. В електрохімічних датчиках тиску є три чи чотири електроди і частину корпусу роблять у вигляді гнучкої мембрани. Зовнішній тиск передається через мембрану на електроліт, що починає рухатися, і тоді на один з електродів потрапляє більше іонів. Струм цього електрода зростає, і за ним можна робити висновок про тиск. Такі датчики застосовуються тільки для вимірювання змінного тиску. Подібно такому датчику працюють електрохімічні мікрофони, зокрема застосовувані для підвідного акустичного зв'язку - гідрофони.

Велику групу приладів хемотроніки складають *електрокінетичні перетворювачі*. Вони базуються на використанні електрокінетичного руху. Це рух позитивних або негативних частинок рідкої речовини під дією електричного поля. Як уже зазначалося, рух іонів під дією поля називається міграцією. Рух в електричному полі більших частинок, ніж іони, має назву електрофорез. Рух рідини через пористу перегородку чи капіляр під дією поля - електроосмос. Робота електрохімічного приладу на основі електрофорезу або електроосмосу називається насосним режимом. Але можливий і інший - генераторний режим. Він полягає в тому, що під дією тиску рідина проходить через пористу перегородку і тоді між протилежними сторонами перегородки виникає різниця потенціалів. Принцип роботи електрокінетичного приладу в генераторному режимі пояснений на рисунку 1.35. Пориста перегородка, на якій із двох боків є електроди 1 і 7 у

вигляді металевих сіток, поділяє прилад на дві камери 3 і 6, заповнені електролітом. Зовнішній тиск може бути переданий на електроліт через гнучкі мембрани 4 і 5. Тиск на одну з мембран викликає проштовхування рідини через пористу перегородку, і тоді на електродах з'являється різниця потенціалів. Подібний прилад служить для вимірювання змінного тиску, і на його основі можуть бути побудовані електрокінетичні мікрофони, гідрофони, віброметри, тобто прилади для вимірювання змінних переміщень (вібрацій) та акселерометри - прилади для вимірювання прискорень. Діапазон робочих частот у подібних приладах складає величину від 0,1 до 105 Гц.

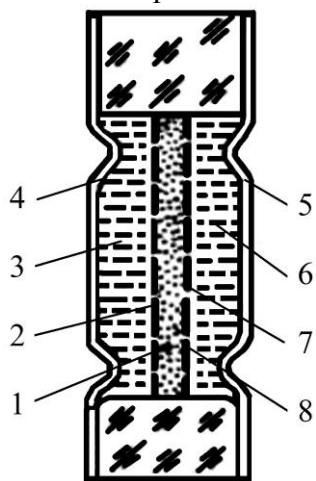


Рисунок 1.35 - Схема будови електрокінетичної комірки

Цікавими електрохімічними приладами для накопичення електричного заряду є *іонікси (іоністори)* - еквіваленти конденсаторів надвеликої ємності). Будова іонікса схематично показана на рисунку 1.36. Срібний і вугільний електроди розділені твердим електролітом, таким, як рубідій - іодид срібла $RbAg_4I_5$ або сульфід - іодид срібла Ag_3SI . При

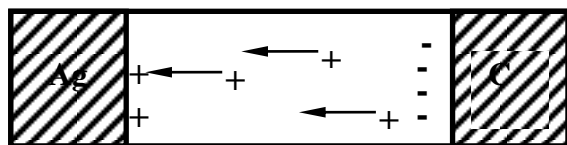


Рисунок 1.36 - Принцип будови іонікса

протіканні струму на поверхні вугільного електрода, що є анодом, утвориться подвійний електричний шар, аналогічний системі двох різнойменних зарядів у конденсаторі, питома ємність у іоніксів може досягати 10 Ф/см^2 , тобто на три порядки вище, ніж в оксидних (електролітичних) конденсаторів. Іонікси можуть зберігати заряд один-два роки зі зменшенням його усього лише на 3 - 5 %. Основним недоліком іоніксів є низька робоча напруга, не більше 0,5 В. Крім того, це інфранизькочастотні прилади, тому що вже при частоті 20 Гц їх ємність зменшується в 100 разів. Робочі температури в них від -60 до +175 оС. Для більш високих напруг іонікси з'єднують послідовно. Наприклад, для одержання ємності 5 Ф при робочій напрузі 5 В треба з'єднати послідовно 10 іоніксів ємністю по 50 Ф. Така батарея іоніксів може використовуватися як джерело струму і давати, наприклад, струм 1 мА протягом 5000 с при зниженні напруги від 5 до 4 В.

Особлива група електрохімічних приладів - *візуальні електрохімічні індикатори*. У найпростішому випадку - це два електроди в електроліті в невеликому скляному балончику. Електроліт застосовують такий, щоб він змінював свій колір при подачі напруги на електроди. Напруга, яка подається, може бути постійною, змінною або імпульсною, але обов'язково низькою. На їх основі створюють матричні індикаторні панелі. В них розміщують дві взаємно перпендикулярні системи електродів - кожна у вигляді паралельних металевих смуг. Подача напруги та ту чи іншу пару електродів (смуг) викликає зміну кольору електроліту. Основні переваги електрохімічних індикаторів: низький рівень керуючих сигналів, мала потужність (100 мВт - 100 мкВт), великий динамічний діапазон (до 80 дБ), великий ресурс роботи (до 90000 годин),

можливість роботи на низьких та інфранизьких частотах. Існують різні типи електрохімічних індикаторів, робота яких ґрунтується на тих чи інших фізико-хімічних процесах в електролітах.

1.6.3 Магнітоелектроніка

1.6.3.1 Загальна характеристика

Магнітоелектроніка - галузь електроніки, яка присвячена теорії і практиці створення пристроїв, що ґрунтуються на явищах електромагнетизму та магнітної індукції, таких, як намагнічування, перемагнічування, розмагнічування осердь імпульсним або безперервним струмом, виникнення ЕРС в провіднику, який рухається, під дією магнітного поля. Магнітоелектроніка пов'язана з появою нових магнітних матеріалів, які мають малу намагніченість насичення, та з розробленням технологічних методів одержання тонких магнітних плівок. На перемагнічування тонкоплівкового елемента, товщина якого не перевищує товщини одного домену, потрібна енергія, яка в 10-20 разів менша, та час, в 10-30 разів менший, ніж на перемагнічування феритового осердя. Найбільш цікавими є тонкоплівкові металеві магнітні матеріали в мікроелектронних запам'ятовувальних пристроях (ЗП), де як елементи пам'яті застосовують магнітні плівки. На тонких плівках можуть бути виконані не тільки елементи пам'яті ЕОМ, а й логічні мікросхеми та магнітні підсилювачі.

Досить широкі перспективи побудови функціональних приладів відкривають нові матеріали - магнітні напівпровідники. До них відносять магнетики, які не мають металевої природи електропровідності та являють собою з'єднання магнітних та немагнітних елементів (халькогеніди європія, халькогенідні шпінелі хрому, сильнолеговані ферити).

Розрізняють декілька груп сучасних магнітних елементів: циліндричні магнітні домени; перетворювачі Холла; магніторезистори; магнітодіоди; магніто-транзистори та магнітотиристри.

1.6.3.2 Циліндричні магнітні домени

Для створення магнітних елементів у мікроелектроніці застосовують магнітні плівки товщиною від 0,1 мкм до 10 мкм, які наносяться на підкладку. Важлива властивість магнітних елементів полягає в тому, що в них процеси намагнічування, перемагнічування та розмагнічування проходять набагато швидше, ніж в елементах із звичайними осердями.

Магнітні плівки мають доменну структуру, тобто складаються із окремих мікроскопічних областей - доменів із спонтанним намагнічуванням. У межах окремого домену атоми намагнічені в одному напрямку, тому кожен домен можна розглядати як окремий елементарний невеликий магніт. По товщині магнітної плівки розміщений один шар доменів. Тому зміна доменної структури може відбуватися лише повздовж поверхні плівки. Вектор поля доменів перпендикулярний до цієї поверхні. Домени мають різні розміри, різну форму та різний напрямок вектора магнітної індукції. Якщо на магнітну плівку діє зовнішнє магнітне поле, вектор якого спрямований перпендикулярно до поверхні плівки, то домени з вектором поля того самого напрямку збільшуються у розмірах, а домени з протилежним напрямком вектора поля зменшуються і при деякому значенні напруженості зовнішнього поля перетворюються в циліндричні магнітні домени (ЦМД). Діаметр ЦМД складає 1 - 5 мкм. При більш сильному магнітному полі домени зникають. Циліндричні магнітні домени можна створювати за допомогою генератора доменів у вигляді дротової петлі із струмом (рис.1.38). Така петля з тонкої металевої плівки наноситься на поверхню основної магнітної плівки. Якщо основна плівка пронизана зовнішнім магнітним полем, а через петлю генератора доменів пропускається

імпульс струму, який створює магнітне поле з протилежно направленим вектором індукції, то в магнітній плівці створюється ЦМД.

У запам'ятовувальних пристроях наявність ЦМД відповідає цифрі 1, а відсутність - цифрі 0. Домени - це стійкі утворення, і для запису двійкової інформації їх можна переміщувати в будь-якому напрямку, віддаляючи від генератора доменів, щоб останній при появі на ньому нових імпульсів струму, які відповідають цифрі 1, міг створювати нові домени. Таким чином, на відміну від системи запису інформації на магнітній плівці, яка рухається в даній системі, ЦМД, які несуть інформацію, самі рухаються по нерухомій плівці.

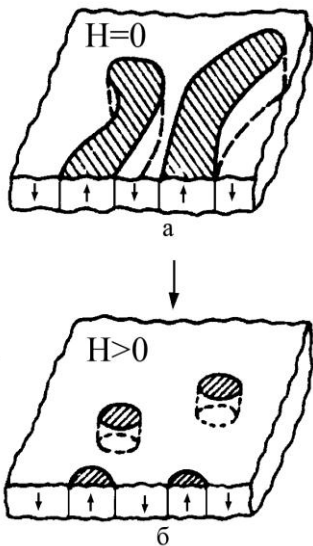


Рисунок 1.37 – Схема утворення ЦМД: а - домени за відсутності магнітного поля, б - ЦМД, які утворилися під дією зовнішнього магнітного поля

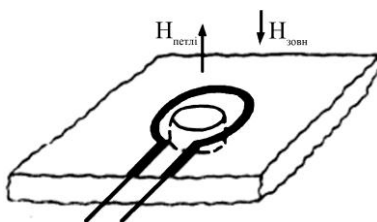


Рисунок 1.38 – Генератор доменів



Рисунок 1.39 – Магніто-резистивна петля для зчитування інформації

Зчитування інформації проводиться різними методами. Наприклад, на основну плівку наноситься петля з напівпровідника, який має магніторезистивний ефект (ефект Гаусса) - зміну магнітного опору під дією змінного магнітного поля (рис. 1.39). Через петлю пропускають постійний струм. Якщо під петлею проходить ЦМД, то магнітне поле в петлі змінюється. Тоді змінюється опір петлі і струм в ній, що відповідає цифрі 1. Постійний струм в петлі струму в петлі означає цифру 0. Циліндричні магнітні домени можуть успішно застосовуватися не тільки в запам'ятовувальних пристроях, але також у різних логічних і інших елементах ЕОМ.

1.6.3.3

Магніторезистори

Магніторезистори - це напівпровідникові резистори, в яких електричний опір залежить від діючого на резистор магнітного поля. Зміна електричного опору під дією поперечного магнітного поля називають магніторезистивним ефектом (рис.1.40). Цей ефект можна пояснити наступним чином. Якби усі електрони мали однакову середню швидкість, то при рівності сили поля і сили Лоренца вони рухлися

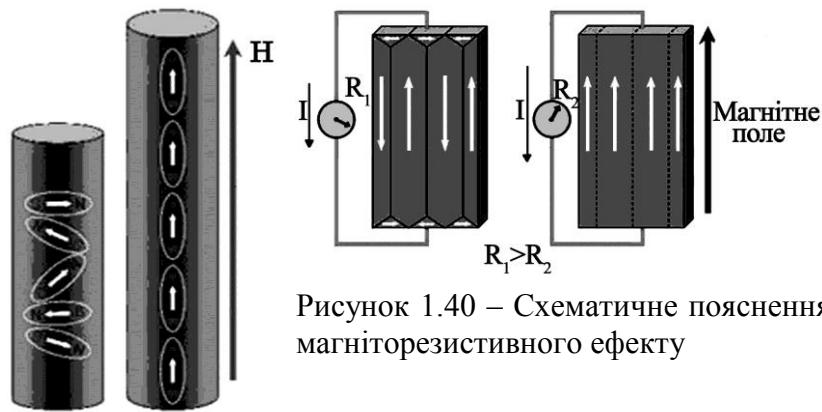


Рисунок 1.40 – Схематичне пояснення магніторезистивного ефекту

б так, начебто магнітного поля взагалі немає. Але в дійсності швидкості у електронів різні. Тому для електронів, швидкість яких відрізняється від середньої, немає рівності сили полочи і сили Лоренца. Одна з цих сил більше іншій і викликає відхилення електронів. Траєкторії таких електронів викривляються і шлях електронів стає довше, а це означає, що збільшується опір напівпровідника. При збільшенні магнітної індукції від 0 до 1 Тл опір магніторезисторів може збільшитися у кілька разів.

Основними параметрами магніторезисторів є: номінальний опір за відсутності магнітного поля, температурний коефіцієнт опору, максимально припустима потужність розсіювання.

Магніторезистори застосовуються у вимірювальній техніці (для вимірювання величини магнітної індукції) як безконтактні датчики переміщень, у безконтактних вимикачах і перемикачах, а також пристроях електроніки й електротехніки.

1.6.3.4 Магнітодіоди

Магнітодіоди - це напівпровідникові діоди з р-п – переходом, в яких вольт-амперна характеристика змінюється під дією магнітного поля. Конструктивно магнітодіод являє собою р-п-перехід з невідпрямлюючим омичним контактом, між якими знаходиться область високоомного напівпровідника (рис.1.41 а). Відмінність від традиційних напівпровідникових діодів полягає тільки в тому, що магнітодіод виготовляється з базою, довжина якої d у декілька разів більше довжини дифузійного зміщення носіїв L (кілька мм), тоді як в звичайних діодах $d < L$. Падіння напруги відбувається не на р-п-переході, як в звичайному напівпровідниковому діоді, а на високоомній базі.

При збільшенні індукції поперечного магнітного поля і за рахунок відхилення траєкторії носіїв заряду до поверхні напівпровідника, опір бази значно зростає. Зростає загальний опір діода, прямий струм зменшується, спостерігається *магнітодіодний ефект*. Вольт-амперні характеристики магнітодіодів показують, що з підвищенням магнітної індукції прямий струм зменшується (рис.1.41 б). Великий опір бази призводить до того, що магнітодіоди мають значно більшу пряму напругу, ніж звичайну діоди.

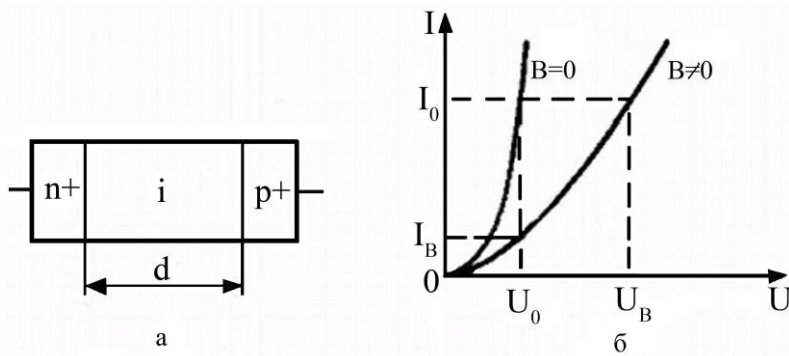


Рисунок 1.41 – Конструкція (а) і вольт-амперна характеристика (б) магніодіода

Основним параметром магніодіода є його магнітна чутливість – відношення змінної напруги U до магнітної індукції і струму живлення I :

$$\gamma = \frac{U}{IB}. \quad (1.41)$$

Розрізняють два типи магнітної чутливості: вольтову магніточутливість γ_U – зміну напруги на магніодіоді при зміні магнітного поля на 1 мТл і постійному значенні струму через магніодіод, яка розраховується за формулою:

$$\gamma_U = \left(\frac{\Delta U}{\Delta B} \right)_{I=const} \quad (1.42)$$

Струмова магніточутливість γ_I визначається зміною струму через магніодіод при зміні магнітного поля на 1 мТл і постійній напрузі:

$$\gamma_I = \left(\frac{\Delta I}{\Delta B} \right)_{U=const}. \quad (1.43)$$

Магніодіоди широко застосовуються: у безконтактних кнопках і клавішах для введення інформації; як датчики визначення положення предметів, які рухаються, для зчитування магнітного запису інформації; для вимірювання і контролю неелектричних величин. На основі магніодіодів конструюють безконтактні реле струму та маніодіодні підсилювачі з коефіцієнтом підсилення в кілька сотен для струмів до 10 А. . Схема на магніодіодах може також замінювати колектор в електродвигуні постійного струму.

1.6.3.5 Магніотранзистори

Магніотранзистори - це транзистори, в яких вихідний струм визначається магнітним потоком, що проходить через нього., а інші характеристики та параметри змінюються під впливом магнітного поля. Цікавою особливістю таких транзисторів є те, що їх вихідний струм чутливий і до світлового потоку. Таким чином створюється можливість подвійного безконтактного керування вихідним сигналом – магнітним потоком та світлом, що значно розширює функціональні можливості магніотранзистора.

Магніотранзистори класифікують на чотири типи: одноперехідні (ОПТ), одноколекторні (ОКТ), двохколлекторні (ДМТ) та польові (ПМТ). Розглянемо кожний тип магніотранзисторів більш детально.

1. *Одноперехідні* – магніотранзистори, що діють на основі модуляції опору бази носіїв заряду, які інjektуються із емітера та мають S-подібну вхідну характеристику (рис.1.42).

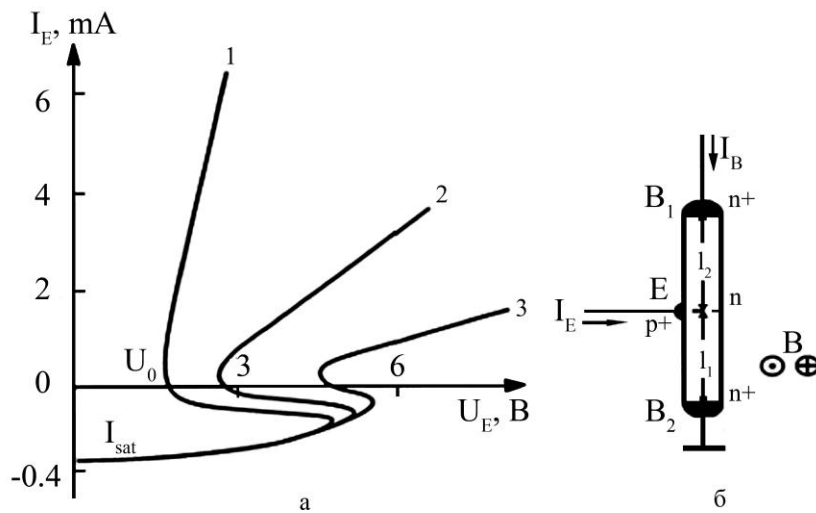


Рисунок 1.42 – Вхідна характеристика ОПТ: крива 1 – $B = 0$; крива 2 – $B = 0,3$ Тл; крива 3 – $B = 0,6$ Тл

Характер кривої 1 вказує на те, що чим більше час життя інжекттованих носіїв в базі, тим глибше вони проникають в неї, і тим менше значення має залишкова напруга U_0 . Якщо транзистор помістити у магнітне поле на інжекттовані носії починає діяти сила Лоренца, яка відхиляє їх до стінок бази або навпаки (в залежності від напрямку магнітного поля). Оскільки швидкість рекомбінації носіїв біля стінок бази значно більша, ніж в її об'ємі, це призведе до зміни час життя інжекттованих носіїв і, відповідно, U_0 .

Магнітна чутливість для ОПТ складає величину порядку $\gamma = 2 \cdot 10^3$ В/АТл.

Залежність U_0 від індукції магнітного поля B застосовують для створення датчиків магнітного поля, які працюють на постійному струмі, а також для побудови на основі цих датчиків генераторів з частотним виходом, тобто із залежністю частоти генерації від манітного поля. Такі генератори дозволяють значно спрощувати з'єднання датчиків з ЕОМ та мікромініатюризувати вимірювальні пристрої.

2. *Одноколекторні* – вертикальні біполярні транзистори (області емітера, бази та колектора розташовані один за одним в напрямку від поверхні в глибину напівпровідника), в яких під дією магнітного поля відбувається викривлення траєкторії носіїв заряду емітера, що приводить до збільшення ефективної довжини бази та відхиленню частини носіїв від колектора (рис.1.43). Збільшення γ таких транзисторів відбувається за рахунок зменшення ширини колектора. Реальні розміри колектора та емітера однакові $(0,6 \times 0,6)$ мм², відстань між ними $l = 0,8$ мм. Найбільша магнітоточливість досягається при включенні ОКТ як двохполюсника (ланцюг емітер - колектор) при вимкнутій базі. В такому випадку при струмі $I_{e-k} = 0,6$ мА магнітоточливість $\gamma = 2 \cdot 10^4$ В/АТл.

3. *Двохколекторні магнітотранзистори* – біполярні транзистори, в яких колектори $K1$ і $K2$ розміщуються симетрично відносно емітера. За відсутності магнітного поля струм емітера поділяють на дві рівні частини, які потрапляють на колектори (рис.1.44). Траєкторії електронів для цього випадку зображені суцільними лініями. Оскільки потенціали колекторів однакові, то падіння напруги між колекторами $\Delta U = 0$ і, відповідно, вихідна напруга $U = 0$.

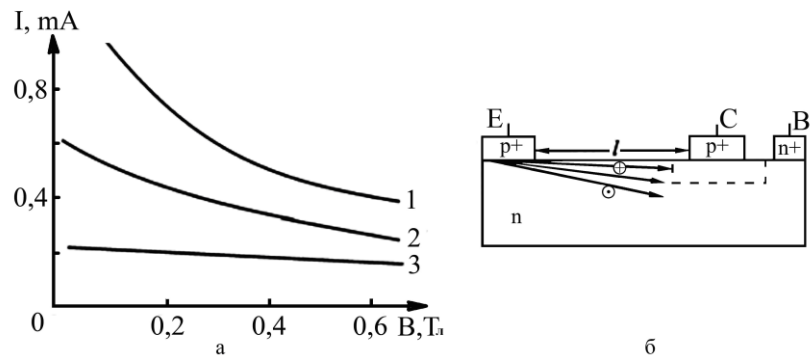


Рисунок 1.43 – Вхідна характеристика (а) та схематичне зображення руху носіїв заряду (б) в одноколекторному магнітотранзисторі: крива 1 – 25 В; крива 2 – 20 В, крива 3– 15 В

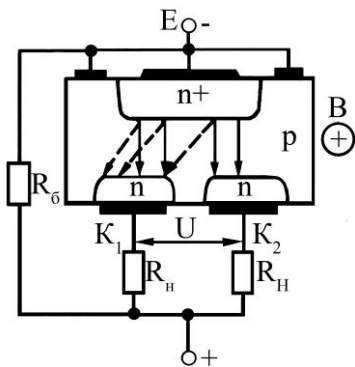


Рисунок 1.44 – Структура та схема ввімкнення ДКТ

Якщо на транзистор почне діяти поперечне магнітне поле (вектор магнітної індукції B такого поля спрямований перпендикулярно до площини креслення), то під впливом сили Лоренца електрони колекторного струму будуть відхилятися. Їхні траєкторії показані штрихованими лініями. На колектор $K1$ буде потрапляти більше електронів, і його струм збільшиться, а струм колектора $K2$ відповідно зменшиться. Потенціали колекторів стануть різними. Вихідна напруга між колекторами збільшиться $U \neq 0$ зі збільшенням магнітної індукції B .

4. *Польові магнітотранзистори* – польові транзистори, в яких опір каналу (вбудованого або індукваного) змінюється під дією магнітного поля (рис.1.45). Широке застосування вони знайшли як такі, що виконують функції датчика Холла.

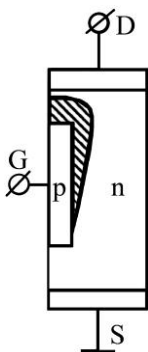


Рисунок 1.45 - Структура ПМТ з p-n-переходом: D – сток, S – витік, G - джерело

Ефект Холла – це гальвано-магнітний ефект, який полягає у тому, що при протіканні струму в напівпровіднику виникає поперечна різниця потенціалів, якщо на цей напівпровідник діє магнітне поле, вектор якого перпендикулярний до напрямку струму. При ефекті Холла залежність між напругою та магнітною індукцією, яку ця напруга викликає, є лінійною. Електрорушійна сила (ЕРС) датчика Холла:

$$U_H = \frac{IBR_H}{d}. \quad (1.44)$$

Для збільшення його чутливості датчика Холла необхідно зменшити його товщину d . Для цього використовується польовий ефект і зменшується товщина напівпровідника. ПМТ відрізняється від звичайного тільки тим, що на кінцях його каналу розташовані два додаткових бокових омичних контакти для фіксації ЕРС Холла. Кремнієві магнітотранзистори з каналом р-типу при струмі $ID = 0,1 \text{ mA}$ мають магніточутливість $\gamma = 400 \text{ В/АТл}$.

Польові магнітотранзистори застосовуються для різномагнітних вимірювальних приладів: безконтактних вимірювачів сили струму, що особливо важливо для вимірювання сильних постійних струмів, які проходять по проводах великого діаметра і практично неможливо їх розривати для включення амперметра; вимірювання електричної потужності; вимірювання неелектричних величин (тиск, переміщення, кут) та рухливості і концентрації носіїв заряду в напівпровідниках.

1.6.3.6 Магнітотристоры

Магнітотристоры – це напівпроїдникові тристоры типу $p-n-p-n$, в яких, в яких напругу ввімкнення можна змінювати, впливаючи зовнішнім магнітним полем. За відсутності магнітного поля магнітотристоры мають деяку середню напругу ввімкнення. Збільшуючи напруженість магнітного поля в одному напрямку, можна підвищити напругу ввімкнення, а в протилежному напрямку – знизити, тобто змінювати ВАХ магнітотристора (рис.1.46). Емітер виконує роль аноду (А), керувальні електроди ($c1, c2$)

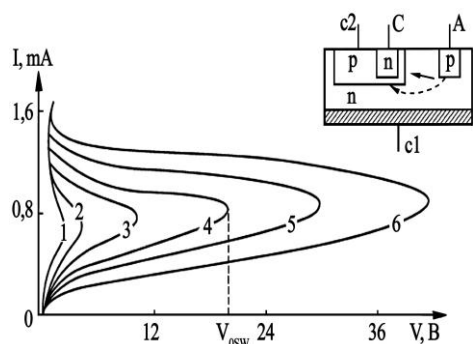


Рисунок 1.46 – ВАХ Si- магнітотристора, відстань між р-облас-тями 100 мкм:

- 1 – $B = -1 \text{ Тл}$;
- 2 – $B = -0,8 \text{ Тл}$;
- 3 – $B = -0,4 \text{ Тл}$;
- 4 – $B = 0$;
- 5 – $B = 0,4 \text{ Тл}$;
- 6 – $B = 0,8 \text{ Тл}$

1.7 Акустoeлектроніка

Акустoeлектроніка - галузь електроніки, яка присвячена теорії і практиці створення пристроїв, заснованих на акустoeлектронній взаємодії, які служать для пере-творення та обробки сигналів. Це можуть бути перетворення тимчасові (затримка сигналів, вимірювання їх тривалості), частотні та фазові (перетворення частоти і спектра, фазовий зсув), амплітудні (підсилення та модуляція), складні (кодування та інтегрування). Усі ці види перетворень використовуються в радіолокації, далекому зв'язку, автоматичному управлінні, обчислю-вальної техніці та ряді інших галузей електроніки.

Виникнення в металі чи напівпровіднику струму або електрорухомої сили під дією ультразвукових хвиль називають *акустoeлектричним ефектом*. Акустoeлект-ричний ефект викликається дією або об'ємних ультра-звукових хвиль в товщі звукопровода, або поверхневих акустичних хвиль - пружних хвиль, які поширюються по вільній поверхні твердого тіла або вздовж границі твердого тіла з другим середовищем та затухають при віддаленні від межі. Останнім часом широко застосовуються акустoeлектронні прилади на поверхневих акустичних хвилях: лінії затримки, полосові фільтри, резонатори, датчики. Принцип дії таких приладів показано на рисунку 1.47. Як звукопровід 1 застосовують пластину, стрижень або провід з п'єзоелектричного матеріалу (ніобат літію $LiNbO_3$, п'єзокварц SiO_2 , германат вісмуту $Bi_{12}GeO_{20}$, п'єзокераміка та ін.) з полірованою поверхнею, на якій розміщені електромеханічні перетворювачі: вхідний 2 і вихідний 3. Такі

перетворювачі називають зустрічно-штирьовими (ЗШП) та виконуються у вигляді гребінчастих електродів з тонкої металевої плівки (0,1 - 0,5 мкм).

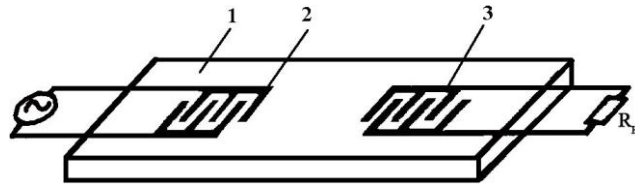


Рисунок 1.47 - Принцип будови акустoeлектронного пристрою на поверхневих акустичних хвилях

До вхідного ЗШП під'єднане джерело електричного сигналу, і в звукопроводі виникає поверхнева акустична хвиля. А у вихідному перетворювачі, до якого під'єднане навантаження, виникає електричний сигнал.

Основними параметрами перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях є: внесене загасання, вхідний та вихідний опір, частотна вибірковість, смуга частот, що пропускаються. Усі ці параметри залежать головним чином від пристрою ЗШП. Звичайний ЗШП не є односпрямованим. У пристрої, зображеному на рисунку 6.13, тільки 50% енергії, випромінюваної вхідним ЗШП, йде до вихідного ЗШП. Інша енергія, що йде в інших напрямках, губиться. Інакше кажучи, розглянутий найпростіший акустoeлектронний пристрій вносить велике загасання. Тому важливою проблемою при створенні високоефективних акустoeлектронних компонентів є зменшення внесеного загасання шляхом раціонального конструювання ЗШП. Необхідно також, щоб перетворення електричних сигналів в акустичні і навпаки відбувалося в даній смузі частот. Це особливо важливо для смугових фільтрів і широкосмугових ліній затримки.

Геометричні розміри і форма вхідного ЗШП визначають ефективність перетворення електричного сигналу в акустичну хвилю. Для кожної частоти найбільш ефективно перетворення отримується при визначених розмірах ЗШП. Число штирів ЗШП визначає відносну смугу частот, що пропускаються. Найширша смуга буде при ЗШП, що складається з двох штирів. Чим більше штирів, тим менша ширина смуги пропускання.

Робота перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях погіршується через вторинні явища, до яких належить, наприклад, відображення хвиль від границь звукопроводу і від границь електродів. Це відображення є основною причиною перекручувань вихідного сигналу і погіршення параметрів пристрою. Шкідливим варто також вважати пряме проходження електричного сигналу з входу на вихід і передачу сигналу об'ємною акустичною хвилею. При зниженні загасання і зменшенні відображення за рахунок особливих конструкцій ЗШП досягається односпрямована передача.

Лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях звичайно вносять загасання 0,5 - 1,5 дБ. Верхня частота, на якій працюють такі лінії, досягає 2 ГГц. Відносна смуга пропускання може бути дуже різною: від часток відсотка до 100%. Тривалість затримки в залежності від відстані між ЗШП і від конструкції складає одиниці - сотні мікросекунд. Затримка може бути фіксованою чи регульованою. На торці звукопроводу звичайно наносять звуковбирні покриття, щоб зменшити відображення хвиль.

Динамічний діапазон ліній затримки 80 - 120 дБ. Для гарної роботи лінії затримки важлива температурна стабільність її параметрів. Температурний коефіцієнт затримки (ТКЗ) близький до нуля, одержують або застосовуючи спеціальний матеріал для звукопроводу (наприклад, кремній з домішкою фосфору), або роблячи звукопровод із двох частин, що мають ТКЗ різного знака, що створює взаємну компенсацію. Діапазон робочих температур ліній затримки складає десятки градусів. Для збільшення часу затримки шлях хвилі роблять у вигляді спіралі чи ламаної лінії або з'єднують послідовно кілька ліній

затримки. Лінії затримки, які регулюються мають декілька ЗШП, розміщених на різних відстанях. Вмикаючи той чи інший ЗШП, можна змінювати час затримки.

1.8 Оптоелектроніка

1.8.1 Загальна характеристика

Оптоелектроніка - це галузь електроніки, яка присвячена теорії і практиці створення приладів та пристроїв, заснованих на перетворенні електричних сигналів в оптичні та навпаки.

В оптоелектроніці використовується діапазон довжин хвиль 0,2 мкм - 0,2 мм. Оптоелектронний прилад – це сукупність джерела і приймача випромінювання. Як джерело випромінювання застосовують світлодіоди на основі *GaAs*, як фотоприймачі - фотодіоди та фототранзистори на основі *Si*.

Відміною та особливістю оптоелектронних приладів (ОЕП) від інших є те, що елементи в них оптично пов'язані, але електрично ізольовані один від одного. Завдяки цьому легко забезпечується узгодженість високо- та низьковольтних і високочастотних ланцюгів.

Оптоелектроніка розвивається за двома незалежними напрямками: оптичним та електронно-оптичним. Оптичний напрям базується на ефектах взаємодії твердого тіла з електромагнітним випромінюванням (голографія, фотохімія, електрооптика). Електронно-оптичний використовує принцип фотоелектричного перетворення при внутрішньому фотоефекті з одного боку, та фотолюмінесценції - з іншого (заміна гальванічного та магнітного зв'язку на оптичний, волоконні лінії зв'язку).

Головна проблема оптоелектроніки - суттєве зменшення паразитних зв'язків між елементами однієї мікросхеми та між мікросхемами.

На оптоелектронному принципі можуть бути створені безвакуумні аналоги електронних пристроїв і систем:

- дискретні та аналогові перетворювачі електричних сигналів (підсилювачі, генератори, ключові елементи, елементи пам'яті, логічні схеми, лінії затримки та ін.);
- перетворювачі оптичних сигналів (підсилювачі світла та зображення, плоскі екрани, які передають та відтворюють зображення);
- пристрої відтворення інформації (індикаторні екрани, цифрові табло, картинна логіка та ін.).

Основними факторами, що обумовлюють розвиток оптоелектроніки, є розроблення надчистих матеріалів, досконалої технології нових сучасних приладів та пристроїв, підготовка висококваліфікованих кадрів.

Для виготовлення активних та пасивних елементів оптичних мікросхем широко застосовуються напівпровідникові матеріали, резистивні та провідні метали і сплави, діелектричні з'єднання, плівкові матеріали, фоторезисти, дифузанти. На даний час номенклатура матеріалів, які використовуються в оптоелектроніці досить широка. До них належать речовини високої чистоти, чисті метали та сплави із спеціальними електрофізичними властивостями, дифузанти, різноманітні напівпровідникові з'єднання у вигляді порошків і монокристалів, монокристалічні пластини з кремнію, арсеніду і фосфіду галію, фосфіду індію, сапфір, гранат, різні допоміжні матеріали - технологічні гази, фоторезисти, абразивні порошки та ін.

Найважливішими матеріалами оптоелектроніки є такі речовини, як: *GaAs*, *BaF₂*, *CdTe* (для виготовлення підкладок); структури *GaAlAs/GaAs/GaAlAs* (електрооптичні модулятори); *SiO₂* (матеріал для ізоляції), *Si*, *CdHgTe*, *PbSnSe* (фотодіоди, фототранзистори). У деяких ІМС використовуються *Ni*, *Cr*, та *Ag*. Технологія виробництва оптоелектронних інтегральних мікросхем (ОЕІМС) постійно удосконалюється на основі розроблення нових фізико-технологічних процесів.

ОЕП мають наступні переваги: можливість просторової модуляції світлових пучків та їх значного перетинання при відсутності гальванічних зв'язків між каналами; велике функціональне навантаження світлових пучків завдяки можливості зміни багатьох їх параметрів (амплітуди, напрямку, частоти, фази, поляризації).

1.8.2 Класифікація та характеристика ОЕП

Оптоелектронні прилади - це прилади, принцип дії яких побудований на використанні електромагнітного випромінювання оптичного діапазону. До основних груп оптоелектронних приладів відносять наступні:

- оптовипромінювачі - світловипромінюючі діоди і лазери;
- фотоелектричні приймачі випромінювання - фоторезистори і фотоприймачі з р-п-переходом;
- прилади, що керують випромінюванням - модулятори, дефлектори і ін.; прилади для відображення інформації - індикатори;
- прилади для електричної ізоляції - оптрони;
- оптичні канали зв'язку та оптичні запам'ятовуючі пристрої.

Перераховані вище групи приладів здійснюють генерацію, перетворення, передачу і збереження інформації. Носіями інформації в оптоелектроніці є нейтральні в електричному розумінні частинки - фотони, які нечуттєві до впливу електричних і електромагнітних полів, не взаємодіють між собою і створюють односпрямовану передачу сигналу, що забезпечує високу перешкодозахищеність і гальванічну розв'язку вхідних і вихідних ланцюгів. Оптоелектронні прилади приймають, перетворюють і генерують випромінювання у видимій, інфрачервоній і ультрафіолетовій областях спектру.

Принцип дії оптоелектронних приладів заснований на використанні зовнішнього або внутрішнього фотоефекта. *Зовнішнім фотоефектом* називається вихід вільних електронів з поверхневого шару фотокатода в зовнішнє середовище під дією світла. *Внутрішнім фотоефектом* називається вільне переміщення всередині речовини електронів, звільнених від зв'язків в атомах під дією світла, і змінюючих його електропровідність або визиваючих появу ЕДС на границі двох речовин (р-п-переході).

ОЕП знайшли широке застосування в автоматичних контрольних і вимірювальних системах, обчислювальній техніці, фототелеграфії, звуковідтворюючій апаратурі, кінематографії, спектрофотометрії, для перетворення світлової енергії в електричну, в автоматичні для розв'язки електричних ланцюгів.

Оптрон - напівпровідниковий прилад, в якому конструктивно об'єднані джерело та приймач випромінювання, пов'язані між собою оптичним зв'язком. У джерелі випромінювання електричні сигнали перетворюються в світлові, які діють на фотоприймач та створюють у ньому знову ж електричні сигнали. Якщо оптрон має тільки один випромінювач та один приймач випромінювання, то його називають *оптопарою* або елементарним оптроном.

Мікросхема, яка складається із однієї або декількох оптопар з додатковими пристроями для узгодження та підсилення сигналу, називається *оптоелектронною інтегральною мікросхемою*. На вході та виході оптрону завжди є електричні сигнали, а зв'язок входу і виходу відбувається завдяки світловому сигналу.

1.8.3 Фоторезистори

Фоторезистори - це напівпровідникові резистори, які змінюють свій опір під впливом світлового потоку (рис.1.48). В залежності від спектральної чутливості фоторезистори поділяють на дві групи: для видимої частини спектру та для інфрачервоної

частини спектру. Для виготовлення фоторезисторів використовують з'єднання *Cd* та *Pb*. Чутливі елементи виготовляють із монокристалів або полікристалів цих з'єднань.

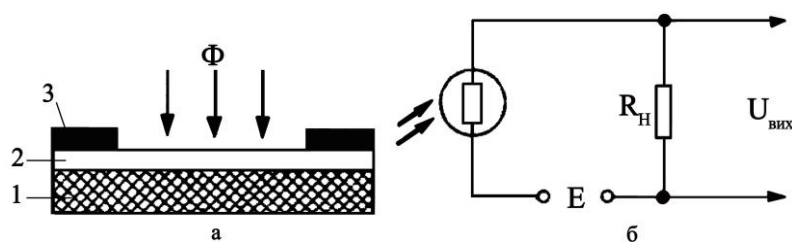


Рисунок 1.48 - Принцип будови та схема ввімкнення фоторезистора

Позначення фоторезисторів ранніх випусків: 1 елемент - літери, які означають тип приладу (ФС - фотоопір), 2 елемент - літера, яка означає матеріал світлочутливого елементу (А - сернистий свінець, К - сернистий кадмій, Д - селеністий кадмій), 3 елемент - цифра, яка означає тип конструктивного виконання. Літера Б перед цифрою - герметичний варіант виконання, П - плівковий матеріал фоточутливого елемента, М - монокристалічний матеріал фоточутливого елемента. Літера Т - тропічний варіант, призначений для експлуатації в умовах підвищених температур та вологості.

Позначення сучасних фоторезисторів: 1 елемент - літери, які означають тип приладу (СФ - опір фоточутливий), 2 елемент - цифра, яка означає матеріал світлочутливого елемента (2 - сернистий кадмій, 3 - селеністий кадмій, 4 - селеністий свінець), 3 елемент - цифра, яка означає порядковий номер розробки.

Фоторезистори мають високу стабільність параметрів. Зміна фотоструму є достатньо точною характеристикою його стану. При подовжній експлуатації спостерігається стабілізація фотоструму, при цьому його величина може змінюватись на 20 - 30%. Фоторезистори є чутливими до швидкої зміни температур. Зберігати фоторезистори слід при температурі 5 - 35 °С та вологості не більше за 80%.

До основних параметрів фоторезисторів відносять:

Темновий струм (I_m) - струм, який проходить через фоторезистор при робочій напрузі через 30 с після зняття освітленості 200 лк.

Світловий струм (I_c) - струм, який проходить через фоторезистор при робочій напрузі та освітленості 200 лк від джерела світла з кольоровою температурою 2850 К.

Температурний коефіцієнт фотоструму ($TK I_\phi$) - зміна фотоструму при зміні температури фоторезистора на 1 °С.

Робоча напруга (U_ϕ) - напруга, яку можна прикласти до фоторезистора при тривалій експлуатації без зміни його параметрів більше за встановлені.

Темновий опір (R_m)- опір фоторезистора при температурі 20°С через 30 с після зняття освітленості 200 лк.

Питома чутливість (K_0) - відношення фотоструму до добутку величин світлового потоку, який падає на нього та прикладеної напруги: $K_0 = I_\phi / (\Phi U_\phi)$, де Φ - світловий потік, лм.

Постійна часу (τ) - час, продовж якого фотострум змінюється в е разів при його освітленні.

Потужність розсіювання ($P_{роз.}$) - максимально допустима потужність, яку фоторезистор може розсіювати при безперервному електричному навантажуванні та температурі навколишнього середовища, не змінюючи параметрів більше норми, яка встановлена технічними умовами.

Опір ізоляції (R_i).

10. Довгохвильова межа (λ).

Основними характеристиками фоторезисторів є такі:

Вольт-амперна ($I = f(U)$) - залежність світлового, темного або фотоструму (при $\Phi = const$) від прикладеної напруги (рис.1.49).

Світлова або люкс-амперна ($I = f(E)$) - залежність фотоструму від світлового потоку, який падає або освітленості (при $U = const$).

Спектральна ($I = f(\lambda)$) - залежність фотоструму від довжини хвилі світлового потоку (при $U = const$).

1. Частотна ($I_{\Phi} = f(F_{\Phi})$) - залежність фотоструму від частоти модуляції світлового потоку (при $U = const$).

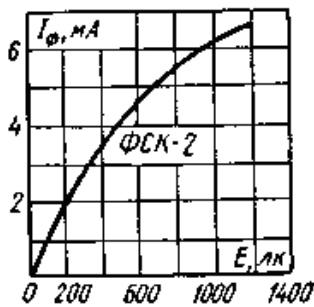


Рисунок 1.49 – Вольт – амперна характеристика фоторезистора ФСК-2

Висока інтегральна чутливість дозволяє використовувати резистори іноді без підсилювачів, а малі габарити є причинами їхнього широкого застосування. Основні недоліки фоторезисторів - їх інерційність і сильний вплив температури, що приводить до великого розкиду характеристик.

1.8.4 Фотодіоди

Фотодіоди - це напівпровідникові діоди, в яких використовується внутрішній фотоелектричний ефект. Світловий потік керує зворотним струмом фотодіодів. Під дією світла на електронно-дірковий перехід відбувається генерація пар носіїв заряду, провідність діода зростає та збільшується зворотний струм. Такий режим роботи називається фотодіодним режимом (фотоперетворювальний) (Рис. 2.3). Другий тип режиму - вентиляльний (фотогенераторний). На відміну від вентиляльного для фотодіодного режиму необхідним є зовнішнє джерело живлення.

Основні параметри фотодіодів : інтегральна чутливість (~ 10 мА/лм): робоча напруга (10 - 30 В); темновий струм ($\sim 2 - 20$ мкА).

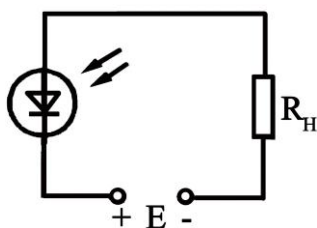


Рисунок 1.50 - Схема ввімкнення фотодіода для роботи у фотодіодному режимі

Основні характеристики фотодіодів: вольт-амперна ($I = f(U)$) - залежність світлового, темного або фотоструму (при $\Phi = const$) від прикладеної напруги (рис. 1.51); енергетична ($I\Phi = f(\Phi)$) - залежність фотоструму від світлового потоку (при $U = const$) - лінійна, мало залежить від напруги (рис. 1.52).

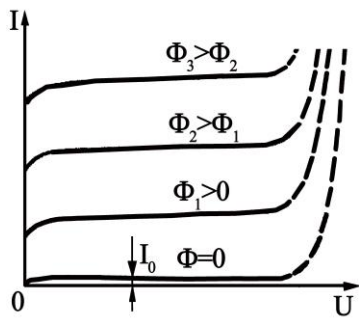


Рисунок 1.51 - Вольт-амперні характеристики фотодіода для фотодіодного режиму

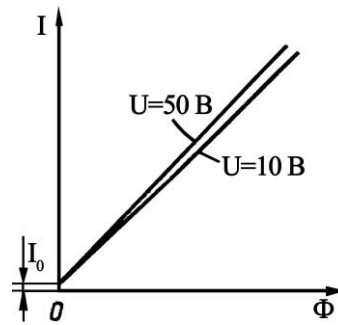


Рисунок 1.52 - Енергетичні характеристики фотодіода

У лавинних фотодіодах відбувається лавинне розмноження носіїв в n-p-переході і за рахунок цього в десятки разів зростає чутливість. Фотодіоди з бар'єром Шотткі мають високу швидкодію. Фотодіоди з гетеропереходами працюють як генератори ЕРС. Германієві фотодіоди використовують як індикатори інфрачервоного випромінювання; кремнієві – для перетворення світлової енергії у електричну (сонячні батареї для автономного живлення різноманітної апаратури у космосі); селенові - для виготовлення фотоекспонетрів та світло-технічних вимірювань, оскільки їх спектральна характеристика є близькою до спектральної характеристики ока людини.

1.8.5 Фототранзистори

Фототранзистори - це напівпровідникові прилади з двома p-n-переходами, призначеними для перетворення світлового потоку в електричний струм.

Від звичайного біполярного транзистора фототранзистор конструктивно відрізняється тим, що в його корпусі передбачене прозоре вікно, через яке світло може попадати на область бази. Напруга живлення подається на емітер і колектор, його колекторний перехід виявляється закритим, а емітерний - відкритим. База залишається вільною (рис. 1.53). При освітленні фототранзистора в його базі генеруються електрони і дірки. У колекторному переході відбувається розподіл електронно-діркових переходів, що досягли, внаслідок дифузії, межі переходу. Дірки (неосновні носії зарядів у напівпровіднику), перекидаються полем переходу в колектор, збільшуючи його власний струм, а електрони (основні носії зарядів) залишаються в базі, знижуючи її потенціал. Зниження потенціалу бази приводить до утворення додаткової прямої напруги на емітерному переході і підсилення інжекції дірок із емітера в базу. Інжектвані в базу дірки, досягаючи колекторного переходу, викликають додаткове збільшення струму колектора. Навіть невелика зміна прямої напруги емітера викликає велику зміну струму колектора, тобто фототранзистор є підсилювачем.

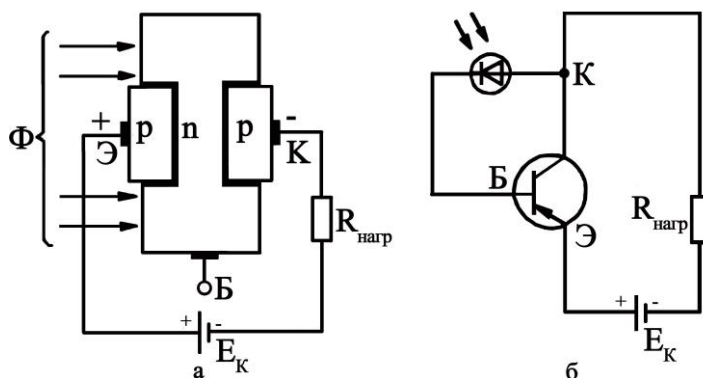


Рисунок 1.53 - Структурна схема біполярного фототранзистора з вільною базою (а) і схема ввімкнення фототранзистора (б)

Струм колектора освітленого фототранзистора виявляється досить великим; відношення світлового струму до темнового сягає декількох сотень. Застосовують два варіанти ввімкнення фототранзисторів: діодне - з використанням тільки двох виводів (емітера і колектора) і транзисторне - з використанням трьох виводів, коли на вхід подають не тільки світловий, а й електричний сигнал.

В оптоелектроніці, автоматичі та телемеханіці фототранзистори використовують для тих же цілей, що і фотодіоди, але вони уступають їм за порогом чутливості і температурним діапазоном. Чутливість фототранзисторів зростає з інтенсивністю їх освітлення.

1.8.6 Фототиристри

Фототиристор - це напівпровідниковий прилад з чотиришаровою р-п-р-п-структурою, який сполучає у собі властивості тиристора та фотоприймача і перетворює світлову енергію в електричну.

При відсутності світлового сигналу і керуючого струму фототиристор закритий і через нього проходить тільки темновий струм. Відкривається фототиристор світловим потоком, що надходить на бази p_2 і n_1 через «вікно» в його корпусі (рис. 1.54), і створює електронно-діркові пари. Це приводить до виникнення первинних фотострумів і утворення загального фотоструму. З цього випливає, що при надходженні світлового потоку на бази p_2 і n_1 зростає емітерний струм і коефіцієнт передачі струму α від емітера до колектора є функцією освітленості, яка змінює струм р-п-переходів. Опір фототиристорів змінюється в межах від 0,1 Ом (у відкритому стані) до 10^8 Ом (у закритому); час переключення складає величину 10^{-5} - 10^{-6} с.

Зі світлової характеристики $I_{np} = f(\Phi)$ при $U_{np} = const$ (рис.1.55 а) видно, що після ввімкнення фототиристора струм

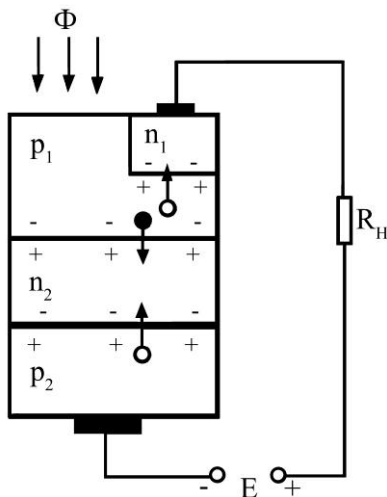


Рисунок 1.54 - Структура фототиристора

струм через нього зростає до $I_{np} = E_{np} / R_{нагр}$ і більше не змінюється, тобто має два стабільних стани та може бути використаний як елемент пам'яті. Із вольт-амперної характеристики $I_{np} = f(U_{np})$ при $\Phi = const$ ($\Phi_2 > \Phi_1 > \Phi_0$) (рис.1.55 б) видно, що зі збільшенням світлового потоку напруга і час ввімкнення зменшуються (рис. 1.55 в).

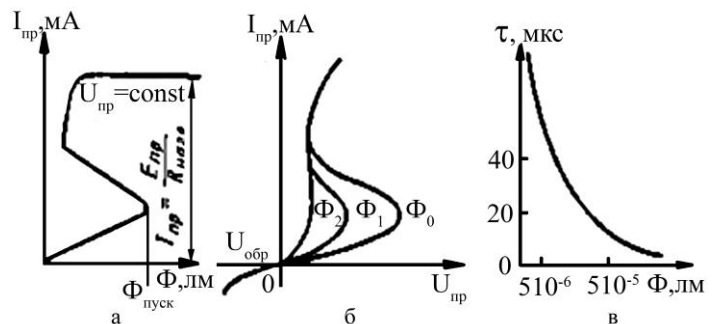


Рисунок 1.55 - Характеристики фототиристора: а - світлова, б - ВАХ, в - залежність часу від світлового потоку

Перевагами фототиристорів є: висока навантажувальна здатність при малій потужності керуючого сигналу; можливість одержувати необхідний вихідний сигнал без додаткових каскадів підсилення; наявність пам'яті, тобто підтримка відкритого стану після зняття керуючого сигналу; велика чутливість; висока швидкодія.

Вищевказані властивості фототиристорів дозволяють спростити схеми, вимкнувши з них підсилювачі і релейні елементи, що є дуже важливим у промисловій електроніці, наприклад у високовольтних перетворювачах. Найчастіше фототиристори використовують для комутації світловим сигналом потужних електричних сигналів.

1.8.7 Світловипромінювальні діоди

Світловипромінювальний діод (світлодіод) — напівпровідниковий пристрій, який випромінює некогерентне світло при пропусканні через нього електричного струму (ефект, відомий як електролюмінесценція).

Випромінюване світло традиційних світлодіодів лежить у вузькій ділянці спектру, а його колір залежить від хімічного складу використаного у світлодіоді напівпровідника. Світлодіоди – це малоінерційні напівпровідникові джерела випромінювання, які працюють при прямій напрузі.

Матеріали для світлодіодів повинні мати ширину забороненої зони більше 1,7 еВ. Германій і кремній непригодні для цього, оскільки ширина забороненої зони у них набагато менша. Для сучасних світлодіодів застосовують головним чином фосфід галія GaP та карбід кремнію SiC, а також тверді розчини - GaAlAs, GaAsP. Внесення в напівпровідник фосфору дозволяє одержувати світіння різних кольорів.

Крім світлодіодів, які дають видиме світіння, випускаються світлодіоди інфрачервоного випромінювання (ІЧВ) із арсеніду галія GaAs. Їх застосовують у фотореле, різноманітних сенсорах, вони входять до складу оптронів. Існують світлодіоди змінного кольору з двома світловипромінювальними переходами, один із яких має максимум спектральної характеристики в червоній частині спектра, а друга - в зеленій. Колір світіння такого світлодіода залежить від співвідношення струмів через переходи.

Основними параметрами світлодіодів є: яскравість - відношення сили світла до площини поверхні, яка світиться (10 - 1000 Кд на см²); постійна пряма напруга (2 - 3 В); колір світіння та довжина хвилі, які відповідають максимальному світловому потоку; максимальний постійний прямий струм (1 - 10 мА); діапазон температур навколишнього середовища, при яких світлодіод може нормально працювати (-60 - +70°C); швидкодія (10-8 с). Основні характеристики світлодіодів наступні: яркісна - залежність яскравості від прямого струму; світлова, спектральна, вольт-амперна характеристики; діаграма напрямленості випромінювання - визначається конструкцією світлодіода, наявністю лінзи і її розташуванням. Випромінювання може бути напрямленим та розсіяним (дифузним).

Сучасні світлодіоди можуть випромінювати на довжині хвилі від інфрачервоної до близького ультрафіолету, та навіть існують методи поширення смуги випромінювання і створення білих світлодіодів. На відміну від ламп розжарювання, які випромінюють світловий потік широкого спектру рівномірно на всіх напрямках класичні світлодіоди випромінюють світло певної довжини хвилі і в певному напрямі. Світлодіод був розвинений до лазерних діодів, які працюють на тому ж принципі, але дозволяють направлене випромінювання когерентного світла.

Патент на перший світлодіод - прилад, що дає випромінювання на напівпровідниковому переході при пропусканні електричного струму, був отриманий працівниками компанії «Texas Instruments» Бобом Б'ярдом і Гарі Пітманом в 1961. Згодом світлодіоди на основі GaAs і GaP почали випускати промислово для використання як індикаторів. Перший світлодіод, який працює у видимому діапазоні був розроблений групою Ніка Холоняка в компанії «General Electric» в 1962. Еволюція світлодіодів у 1960-1970-х поступово привела до створення приладів, які мали колір від червоного до

зеленого. Найбільш популярними матеріалами були GaP (червоний - зелений) та GaAsP (жовтий – високоефективний червоний). При цьому з'явилися багато нових сфер використання світлодіодів у калькуляторах, цифрових годинниках і тестових приладах. На початку [1980-х](#) з появою нового матеріалу, GaAlAs (галій-алюмінієвий арсенід) почалася революція у виробництві світлодіодів. GaAlAs дозволив підвищити ефективність 10 разів, що привело до нових використань у зовнішніх знаках та надписах, зчитуванні штрих-коду, передачі даних через оптичне волокно і медичному обладнанні. Але GaAlAs працював тільки у червоній ділянці спектру (660 нм) та мав короткий час життя (більш 50% падіння ефективності після 100 000 годин роботи). Але частина цих проблем була вирішена за рахунок появи лазерних діодів у 1980 - х роках. Через декілька років був розроблений новий люмінесцентний матеріал InGaAlP, який дозволив плавне підстроювання кольорів за рахунок зміни ширини забороненої зони напівпроїдникового матеріалу. Наступним кроком у розвитку була розробка компанією «Toshiba» метода нанесення MOCVD (метал-оксидне хімічне парове нанесення, Metal Oxide Chemical Vapor Deposition), який дозволив створити більш складний пристрій з ефективністю до 90%. У той же час корпорація «Nichia» запропонувала перші блакитні світлодіоди на основі GaN (нітриді галію), InGaN (індій-галій-нітриді) та SiC (карбіді кремнію). Одним з кроків також стало створення Лабораторією фундаментальних досліджень компанії NTT світлодіода, випромінюючого хвилі в [ультрафіолетовій](#) частині спектру $\lambda = 210$ [нм](#). Випромінювання з такою короткою [довжиною хвилі](#) знайшло широке застосування в [медицині](#) і [техніці](#). Сучасні напрямки розвитку включають розробку органічних світлодіодів, які повинні дозволити виробництво дешевих та екологічно безпечних пристроїв, використання [квантових точок](#), які дозволяють отримувати біле світло, та просування далі у короткохвильову область.

Таблиця 1.6 – Залежність кольору світіння світлодіодів від частоти

Колір	Діапазон довжин хвиль, нм	Діапазон частот, ТГц	Діапазон енергії фотонів, еВ
Червоний	625 - 740	480 - 405	1,68 – 1,98
Помаранчевий	590 - 625	510 - 480	1,98 – 2,10
Жовтий	565 - 590	530 - 510	2,10 - 2,19
Зелений	500 - 565	600 - 530	2,19 - 2,48
Блакитний	485 - 500	620 - 600	2,48 - 2,56
Синій	440 - 485	680 - 620	2,56 - 2,82
Фіолетовий	380 - 440	790 - 680	2,82 - 3,26

Як і в звичайному напівпровідниковому діоді, в світлодіоді є р-п-перехід. При пропусканні електричного струму в прямому напрямі, носії заряду- [електрони](#) і [дірки](#) рекомбінують з випромінюванням [фотонів](#). Далеко не всі напівпровідникові матеріали ефективно випускають світло при рекомбінації. Випромінювачами світла є, як правило, прямозонні напівпровідники типу АІІВV (наприклад, GaAs або InP) і АІІВVI (наприклад, ZnSe або CdTe). Варіюючи склад напівпровідників, можна створювати світлодіоди різних довжин хвиль від ультрафіолета (GaN) до середнього інфрачервоного діапазону (PbS). Діоди на основі непрямозонних напівпровідників (наприклад, з Si або Ge, а також сплавів SiGe, SiC) світло практично не випромінюють. Не дивлячись на це, у зв'язку з розвиненістю кремнієвої технології, роботи із створення світлодіодів на основі кремнію активно ведуться. Останнім часом великі надії пов'язують з технологією [квантових точок](#) і фотонних кристалів.

Кожний колір має кількісно вимірювані фізичні характеристики, наприклад, спектральний склад, яскравість, насиченість, ясність. Стосовно яскравості, слід зазначити, що однаково насичені відтінки, які відносяться до одного й того ж кольору спектру,

можуть відрізнятися один від одного ступінню яскравості. Наприклад, при зменшенні яскравості синій колір поступово наближається до чорного. Будь-який колір при максимальному зниженні яскравості стає чорним. Яскравість, як і інші кольорові характеристики реального забарвленого об'єкту, значно залежать від суб'єктивних причин, обумовлених психологією сприйняття. Так, наприклад синій колір при сусідстві з жовтим здається більш яскравим. Зупинимось на понятті насиченості кольору. Два відтінки одного тону можуть розрізнятися ступенем насиченості. Наприклад, при зменшенні насиченості синій колір наближується до сірого. Ступінь близькості кольору до білого називають *ясністю*. Будь-який відтінок при максимальному збільшенню ясності стає білим. Конкретний хроматичний колір може бути віднесеним до певного спектрального кольору. Відтінки, схожі з одним і тим самим кольором спектру (але розрізняються, наприклад, насиченістю і яскравістю), належать до одного і того ж тону. При зміні тону, наприклад, синього кольору в червоному напрямку спектру він змінюється блакитним, в зворотньому — фіолетовим.

Світловипромінюючі діоди є основою більш складних приладів:

- лінійна світлодіодна шкала - інтегральна мікросхема, яка складається із світлодіодних структур (сегментів), кількість яких від 5 до 100, та розміщені послідовно. Такі шкали замінюють щитові вимірювальні прилади та використовуються для відображення інформації, яка постійно змінюється;
- цифро-літерний світлодіодний індикатор - інтегральна мікросхема із декількох діодних структур, які так, щоб при відповідній комбінації сегментів, які світяться, одержувалось зображення літери або цифри;
- багатоелементний блок – електронна система одержання складних зображень (до її складу входить понад 10000 світлодіодів).

- 1.8.9 Оптичари

-

- *Оптрон* - напівпровідниковий прилад, в якому конструктивно об'єднані джерело та приймач випромінювання, пов'язані між собою оптичним зв'язком. У джерелі випромінювання електричні сигнали перетворюються в світлові, які діють на фотоприймач та створюють у ньому знову ж електричні сигнали. Якщо оптрон має тільки один випромінювач та один приймач випромінювання, то його називають *оптопарою* або елементарним оптроном (рис.1.64).

-

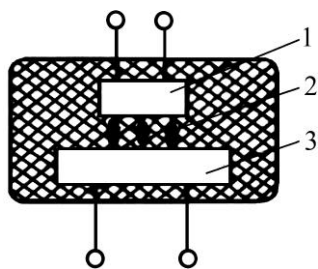


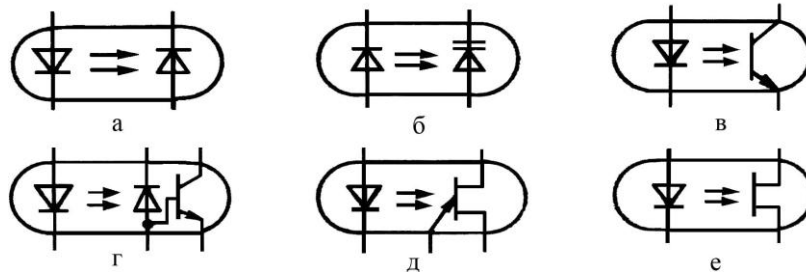
Рисунок 1.64 -Принцип будови оптопар: 1 - випромінювач, 2 - оптичний прозорий клей, 3 - фотоприймач

-

- *Основними перевагами оптронів є наступні:* відсутність електричного зв'язку між входом та виходом та зворотного зв'язку між фотоприймачем та випромінювачем; опір ізоляції між входом та виходом може досягати 10¹⁴ Ом, ємність не перевищує 2 пФ; широка смуга частот коливань, які пропускаються, можливість передавання сигналів з частотою від 0 до 10¹⁴ Гц; можливість керування вихідними сигналами шляхом дії на оптичну частину; висока перешкодозахищеність оптичного каналу, тобто його несприйнятливості до дії зовнішніх електромагнітних полів; можливість сумісництва оптронів з іншими напівпровідниковими та мікроелектронними приладами.
- *До недоліків оптронів можна віднести такі:* відносно велика потужність (двократне перетворення енергії), малий ККД цих перетворень; невисока

температурна стабільність і радіаційна стійкість; малий ресурс роботи; високий рівень власних шумів; необхідність застосування гібридної технології замість більш зручної планарної (джерело та випромінювач виготовляються із різних матеріалів).

- Оптичарі класифікують на чотири групи : резисторні (фоторезистор - світлодіод); тиристорні (фототиристор - світлодіод); транзисторні (фототранзистор - світлодіод); діодні (фотодіод - світлодіод).



- Рисунок 1.65 – Класифікація оптичар: а - діодна, б - діодна з фотоварікапом, в - транзисторна, г - транзисторна із складним транзистором, д - транзисторна з фотодіодом, е - транзисторна з одноперехідним транзистором, ж - транзисторна з польовим фототранзистором, з - тиристорна

- Основними параметрами і характеристиками оптичар різних типів є наступні: максимальний струм ($I_{max}, I_{mвих}$) та напруга ($U_{max}, U_{mвих}$) на вході і виході; вихідний опір при нормальній роботі ($R_{вих}$); темновий вихідний опір RT (темновий струм при відсутності вхідного струму); опір ізоляції; максимальна напруга ізоляції між входом та виходом; час вимкнення та ввімкнення (~ 15 с); фотоЕРС ($\partial o 0,8$ В); коефіцієнт передачі струму - відношення вихідного струму до вхідного ($k=0,1 - 1\%$); вхідна вольт-амперна і передаточна характеристики (залежність вихідного опору від вхідного струму).

- Джерелом випромінювання в резисторній оптичарі виступає світлодіод, надмініатюрна лампа накаливання або електролюмінесцентний конденсатор. Приймачем – фоторезистор (рис.1.66) із селеніду кадмію ($CdSe$) для видимого випромінювання, із селеніду або сульфїду свинця ($PbSe, PbS$) - для інфрачервоного. Резисторна оптичара (рис.1.67) може працювати як при постійному, так і при змінному струмі при добрій узгодженості джерела випромінювання і фоторезистора за спектральними характеристиками.

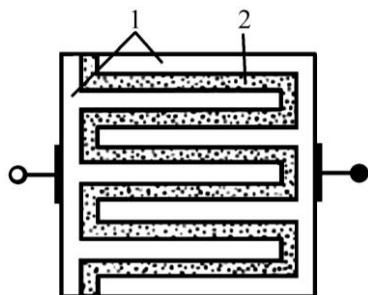
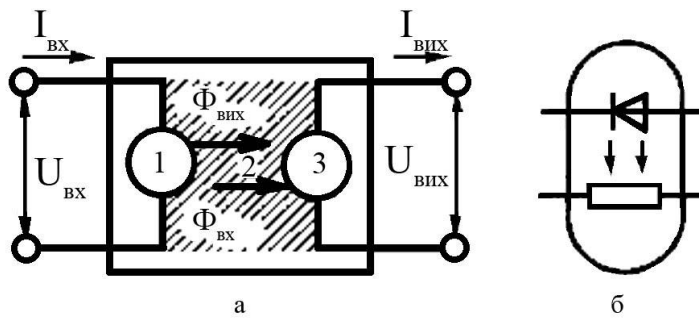


Рисунок 1.66 - Конструкція фоторезистора в резисторній оптичарі: 1 – металеві електроди; 2 – фоточутливий шар



- Рисунок 1.67 - Структура (а) і умовне графічне позначення (б) резисторної оптопари
- Резисторні оптопари застосовують для автоматичного регулювання підсилення, керування безконтактними поділячами напруги, модуляції сигналів, формування різноманітних сигналів. Промисловість також випускає резисторні оптопари, які призначені для комутації сигналу розміщують декілька фоторезисторів.
- Приймачем випромінювання тиристорної оптопари є кремнієвий фототиристор.
- Основні сфери використання тиристорних оптопар: схеми для формування потужних імпульсів, керування потужними тиристорами, керування та комутації різноманітних пристроїв з потужними навантаженнями; діодних оптопар - імпульсні трансформатори, які не мають обмоток, передача сигналів між блоками складаної радіоелектронної апаратури, керування роботою різноманітних мікросхем на МДН-транзисторах, у яких вхідний струм дуже малий.
- Приймачем випромінювання транзисторної оптопари є кремнієвий біполярний фототранзистор *n-p-n*- типу.
- Транзисторні оптопари застосовують в комутаторних схемах, пристроях зв'язку різноманітних датчиків з вимірювальними блоками та реле.

1.8.11.2 Акустооптичні керуючі пристрої

Широкі можливості для керування світловими пучками має акустооптична взаємодія, зумовлена явищем фотопружності або зміною показника заломлення речовини під дією механічних напружень. Разом з тим використовується зміна геометричних розмірів хвилеводів і форми їх поверхні під дією звукових коливань.

Структура найпростішого планарного акустооптичного керуючого пристрою показана на рисунку 1.71.

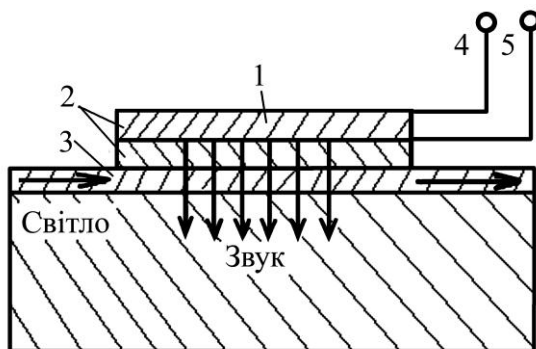


Рисунок 1.71- Акустооптичний керуючий пристрій

П'єзокристал 1 з керуючими електродами 2 генерує поздовжню звукову хвилю, яка через шар 3, що відділяє хвилевід від поглинаючого металевго електрода, і вихідний шар 4 проходить в підкладку 5. Під дією звукової хвилі змінюються параметри хвилеводу (товщина і показник заломлення шарів). Це приводить до фазової модуляції світлової

хвилі, що проходить по світловоду з частотою звуку. Якщо параметри хвилеводу близькі до критичних, відбувається амплітудна модуляція. В приведеній схемі можливе використання і об'ємної звукової хвилі зсуву, яка поляризована перпендикулярно до напрямку світлового променя. В цьому випадку звук створює анізотропію хвилеводу, внаслідок якої виникає взаємна трансформація ТЕ і ТМ - хвиль, яка супроводжується їх амплітудною і фазовою модуляцією.

Найбільший інтерес для побудови планарних акустооптичних керованих пристроїв представляють не об'ємні, а поверхневі звукові хвилі (хвилі Релея), які можуть поширюватися в дуже тонкому поверхневому шарі, суміщеному з оптичним хвилеводом. Це дозволяє досягнути найбільшої ефективності акустооптичної взаємодії. Ці хвилі збуджуються на поверхні підкладки (рис.1.72.) за допомогою ґратки, утвореної зустрічними металевими електродами, яка має крок, рівний половині довжини робочої хвилі Релея. На них подаються напруги, які чергуються за знаком. Хвиля Релея створює на поверхні підкладки біжучу періодичну структуру (ґратку), на якій може дифрагувати світлова хвиля. Глибина модуляції і період цієї структури залежить від інтенсивності і частоти звуку, що дає можливість здійснювати різні види акустооптичної модуляції світла.

Так, світловий пучок, відбитий від звукової ґратки під брегівським кутом, модулюється за амплітудою при зміні частоти звуку або його інтенсивності. В режимі випромінювання зміна періоду звукової ґратки приводить до зміни кутів випромінювання, що використовується для створення дефлекторів світла.

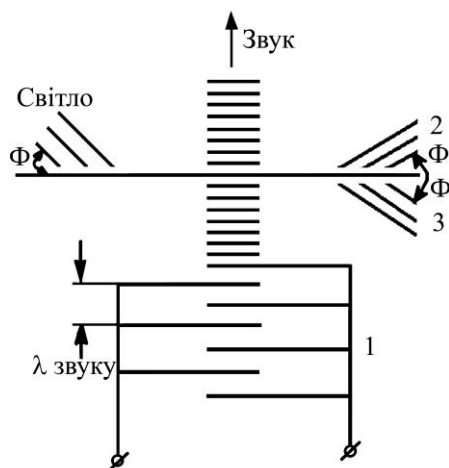


Рисунок 1.72 – Акустооптичний пристрій на поверхневих хвилях

Завдяки ефекту Доплера частота світла, дифрагованого на звуковій ґратці, зміщується на значення, рівне або кратне частоті звуку. Це явище використовується для частотної модуляції світла. Як акустооптичні матеріали використовують кварц, ніобат літію, оксид цинку, арсенід галію, полістирол.

1.8.11.3 Оптикоелектронні запам'ятовуючі пристрої

Необхідність розробки оптичних запам'ятовуючих пристроїв (ЗП) зумовлена тим, що пристрої цього ж призначення, які діють за іншими фізичними принципами (магнітна і напівпровідникова пам'ять), не можуть повністю задовольнити неперервно зростаючих вимог до об'єму інформації, яка зберігається, і щільності її запису.

Пристрої оптичної пам'яті базуються на двох методах запису і вибірки інформації: послідовному (порозрядному) і паралельному (посторінковому). В пристроях першого типу використовують лише направленість світлового променя, в пристроях другого, голографічного – когерентність лазерного випромінювання і можливість його просторової модуляції.

В ЗП послідовного типу запис інформації здійснюється випалюванням лазерним променем отворів в металевій плівці, розміщеній на прозорій основі. Направлення лазерного променя здійснюється механічно (зміню взаємного положення променя і запам'ятовуючого середовища) або за допомогою дефлектора, який відхиляє світловий промінь за заданою програмою. При записуванні інформації випалювання отворів в металевій плівці відповідає логічній одиниці, відсутність отвору – логічному нулю. Як запам'ятовуюче середовище використовують металізовані вісмутом або радієм смужки полієфірної плівки, фотоплівки і пластинки, фоторезисти, фото полімери. Проте органічні матеріали мають схильність до старіння. Найкращу стабільність при довготривалому зберіганні інформації в оптичних ЗП забезпечують плівки хрому на склі. Такі ЗП забезпечують швидкість запису $3 \cdot 10^4$ біт/с і ємність пам'яті приблизно 10^{18} біт. Голографічний принцип запису інформації (рис. 1.73) базується на фіксації фоточутливим шаром інтерференційної картини, яка створюється двома когерентними хвилями: відбитою від об'єкта запису або хвилею, що пройшла через нього, і допоміжною або опорною. Ця зафіксована на фотопластинці картина, що містить повну інформацію про відбиту від об'єкта хвилю з урахуванням не лише інтенсивності, але і фази коливань, являє собою голограму. При освітленні голограми опорним променем відбувається її відновлення – відтворюється зображення об'єкта. Одна з особливостей голографії – можливість запису великого числа голограм на одній пластині при використанні різно направлених опорних пучків. Об'єктом запису є двомірна матриця двоїчних знаків.

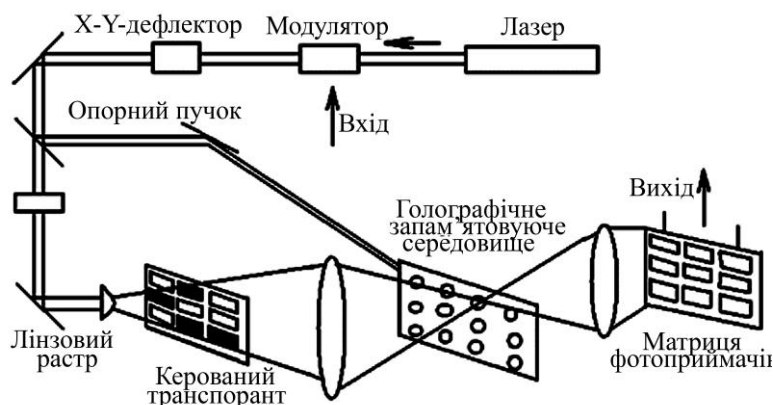


Рисунок 1.73 – Голографічний запам'ятовуючий пристрій

Використання голографічного принципу в пристроях пам'яті зумовлює ряд їх особливостей.

1. Висока щільність запису інформації, властива всім оптичним системам і зумовлена малою довжиною хвилі світла λ .

2. Можливість зчитування інформації у вигляді масивів $10^4 - 10^6$ біт. Це дозволяє підвищити продуктивність системи і зменшити число ІМС. Швидкодія пристрою може стати на декілька порядків вища, ніж дефлектора, що здійснює сканування лазерного променя. Отже, в голографічних системах швидкодія ЗП ще більше зростає.

3. Висока захищеність від перешкод, інформація з кожної частини транспаранта записується у вигляді інтерференційної картини на всій поверхні фотопластинки. При цьому голограма нечутлива до мікро дефектів (порошинки, проколи і т.д.), що особливо дошкуляє в порозрядних системах запису. Крім того, голограма зберігає всю інформацію навіть при відколюванні частини фотопластинки.

4. Можливість запису інформації безпосередньо в аналоговій формі, що відрізняє голографічні ЗП від всіх інших видів запам'ятовуючих пристроїв зі збереженням символів двоїчного коду. В багатьох випадках така фіксація повної картини об'єкту значно простіша і швидша, ніж традиційний послідовний запис по крапках в процесі розгортки

зображення, і забезпечує добре сполучення голографічного ЗП з системами аналогової оптичної обробки інформації.

5. Можливість поєднання в одному пристрої функцій зберігання і логічної обробки, що дозволяє реалізувати асоціативну вибірку інформації.

6. Можливість запису інформації в об'ємі фотореєструючого матеріалу, що розширює їх номенклатуру.

7. Нижчі вимоги до точності механічного юстирування окремих елементів і до оптичної системи голографічних пристроїв в порівнянні з порозрядними оптичними ЗП. Це зв'язано з тим, що голограма в закодованій формі несе інформацію про положення об'єкту.

Пристрої голографічного ЗП зображено на рисунку 1.73. При записуванні інформації промінь лазера за допомогою напівпрозорого дзеркала ділиться на два: сигнальний, який проходить через об'єкт, і опорний. Зміна дефлектором напрямку опорного променя дозволяє послідовно записувати велике число голограм на одну фотопластинку. Як об'єкт запису використовуються фототранспаранти, які при роботі з цифровою інформацією представляють собою двомірну матрицю прозорих і непрозорих ділянок, що відповідають одиницям і нулям двоїчного коду. Транспаранти можуть бути постійними і керованими.

При зчитуванні інформації дефлектор налаштується на певне положення опорної хвилі і таким чином вибирається зображення необхідного транспаранта. При цьому сигнальний промінь перекидається затвором. Подальше вибирання потрібного числа з усього масиву здійснюється електронним шляхом при обробці сигналів фотореєструючої матриці.

Зменшення інтенсивності засвітки елементів фото приймальної матриці від інтерференційних картин інших голограм (які не приймають участі в даній операції зчитування) досягається такою зміною оптичної системи, при якій забезпечується просторовий розподіл голограм на фотопластинці. Повнішого використання фото чутливого матеріалу пластинки можна досягнути при багатоканальній схемі запису - зчитування. В цій схемі на кожен голограму одночасно записується 5 - 10 рознесених у просторі транспарантів, кожен з яких має свій масив інформації і освітлюється своєю оптичною схемою. При цьому опорний промінь загальний для всіх систем. При зчитуванні відновлені зображення цих транспарантів попадають на свої просторово рознесені фото приймальні матриці. Розрахунки показують, що таким шляхом можна збільшити щільність запису інформації в 3 - 6 раз при тій же потужності лазера.

Характеристики голографічних ЗП суттєво залежать від властивостей фотореєструючих матеріалів. Стандартні фотопластинки, які використовуються в голографічних ЗП, забезпечують поєднання високої роздільної здатності ($3 \cdot 10^3$ ліній/мм) і фоточутливості (10^{-5} Дж/см²). Ефективність зчитування, що визначається як відношення енергії в відновленому зображенні до енергії променя, що відновлює для фотопластинок невелика і становить приблизно 5 %. У фотоемульсії на базі біхромату желатину вдається досягнути ефективності зчитування до 30 % в тонких і до 90 % в товстих плівках. У фотопластинок зі срібно - галоїдною емульсією чутливість на два - три порядки вища. Для товстих шарів характерні також усадочні і деформаційні явища, які спотворюють об'ємні голограми при високій щільності запису.

У пристроях оптичної пам'яті необхідні висока направленість і когерентність світлового променя. Цим вимогам з урахуванням вартості і габаритних розмірів найкраще задовольняє гелій-неоновий лазер. Для підвищення щільності запису слід використовувати більш короткохвильові лазери: аргонів ($\lambda = 0,49$ мкм), гелій - кадмієві ($\lambda = 0,32$ мкм), ксенонів ($\lambda = 0,36$ мкм) і криптонів ($\lambda = 0,35$ мкм).

1.8.11.4 Електрооптичні дефлектори

Дефлектори представляють собою оптоелектронні пристрої для керованої зміни просторового положення світлового променя. Вони базуються на електричному і акустооптичному ефектах. Типовий дискретний електрооптичний дефлектор (рис. 1.74) являє собою m – каскадний пристрій, в якому кожен каскад складається з модулятора для поляризації світла двозаломлюючого кристалу. В залежності від комбінації керуючих напруг можна одержати $2m$ дискретних положень вихідного променя 3.

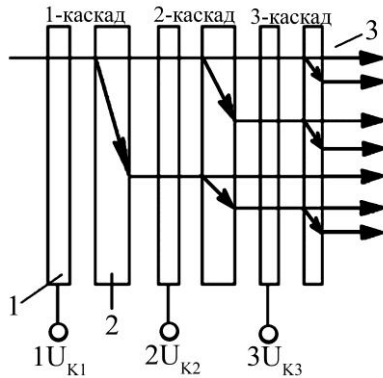


Рисунок 1.74-
Електрооптичний дефлектор

Пристрій конструюється так, щоб забезпечувалось відхилення променя по двох координатах. Загальне число положень відхиленого променя, що досягається в електрооптичному дефлекторі, визначається співвідношенням:

$$NED = \varphi D / \lambda, \quad (1.49)$$

де φ – максимальний кут відхилення променя; D – апертура дефлектора.

Важлива перевага електрооптичного дефлектора – велика швидкодія. В пристрої з $NED \approx 10^3$ час переключення може складати доли мікросекунди. При збільшенні роздільної здатності зростає інерційність системи. В дефлекторах використовуються ті ж самі матеріали, що і в модуляторах. Велике число пластин, через які проходить світловий промінь, висуває жорсткі вимоги до прозорості матеріалів і точності їх обробки і монтажу кожного кристалу.

1.8.11.5 Акустичні дефлектори

Принцип дії акустичного дефлектора (рис.1.75) базується на тому, що при проходженні звукової хвилі в фото-

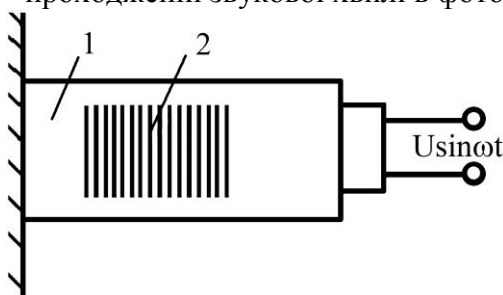


Рисунок 1.75 -
Акустичний дефлектор

пружному середовищі 1 виникають зміни показника заломлення, що відповідають області стиску і розтягування. Це приводить до утворення фазової ґратки 2, період якої дорівнює довжині акустичної хвилі, а амплітуда пропорційна амплітуді акустичної хвилі і фотопружності постійного середовища. Дифракція світла в цій ґратці використовується в дефлекторі. У ряді випадків задовільнені результати досягаються при використанні таких простих матеріалів, як вода і плавлений кварц. Простотою обробки і низькою вартістю характеризуються склоподібні речовини, з яких хороші акустооптичні

властивості телуритне і халькогенідне скло. Але найперспективнішими є кристалічні матеріали: вульфеніт ($PbMoO_4$), пара телурит (TeO_2), ніобат літію ($LiNbO_3$) і деякі інші.

Зміна просторового положення дифрагованого променя світла досягається зміною частоти акустичних коливань і відповідною перестройкою дифракційної ґратки.

Таким чином, основними елементами акустооптичного дефлектора є: фотопружне середовище, п'єзоелектричний перетворювач – збуджував, акустооптичний поглинач. Для двомірної розгортки сполучаються два акустооптичних елементи, які відхиляють промені у взаємно перпендикулярних напрямках. Акустооптичні дефлектори можуть працювати в аналоговому і дискретному режимах, тобто з плавною і дискретною зміною частоти звукових коливань.

Керований транспарант представляє собою двох координатну матрицю елементарних комірок, оптичні властивості яких можуть змінюватися під дією електричного, магнітного або оптичного збудження. При оперуванні дискретною інформацією окремі комірки включаються або на максимальне світлопропускання (стан логічної одиниці), або затемнюються (логічні нулі).

Транспаранти, які управляються електрично, виготовляються на основі різних матеріалів, з використанням електрооптичного ефекту: кристали типу КДР, ДКДР, прозорі сегнетокераміки типу ЦТСЛ, електрохромних речовин, рідких кристалів.

При вводі інформації за допомогою електричнокерованого транспаранта вона поступає на вхідні шини з одного або декількох електричних каналів і запам'ятовується поелементно або по строчно. Після заповнення всього коду транспарант просвічується тактовим світловим імпульсом і зображення картини аналогово або дискретно переноситься на голограму. Використовуються транспаранти прохідного і відбиваючого полів, причому у другому випадку підвищується контрастність на зображення і спрощується електрична комутація елементів. Хоча в будь – якому вигляді електрично керований транспарант представляє собою багатоелементний пристрій з матричною організацією і одномірною структурою вводу. Тому високу швидкість вводу даних реалізувати важко.

Перспективи підвищення швидкості вводу інформації пов'язуються з оптично керованим транспарантом. Його принцип дії базується на перерозподілі напруги від джерела живлення на фоторезистивному і електрооптичному шарах під дією керуючої світлової хвилі, яка створює неоднорідну по площині транспаранта модуляцію провідності фоторезистивного шару. В засвічених областях практично весь спад напруги припадає на електрооптичний шар, в незасвічених – на фоторезистивний.

Характерною особливістю транспаранта є поєднання в ньому моделюючої і підсилюючої властивостей. Цілком можливе підсилення світла в 10 раз при смузі частот 10^7 Гц.

Реверсивні оптичні запам'ятовуючі пристрої базуються на матеріалах, які придатні для багаторазового перезапису і тривалого зберігання оптичної інформації. До цих середовищ виставляється ряд вимог: висока роздільна здатність і дифракційна ефективність, низький енергетичний поріг запису, мала тривалість циклу перезапису, велика тривалість зберігання інформації, можливість зчитування інформації без руйнування і зберігання інформації при включеному живленні, можливість реалізації великої кількості 10^9 циклів перезапису. Остання вимога принципово відрізняє реверсивні середовища від матеріалів для постійного запису. Для фотохромних матеріалів з високою роздільною здатністю характерне постійне старіння інформації під дією зчитуючого променя світла, а також самовільне під дією теплоти. Термопластичні матеріали характеризуються термічним старінням; при великій кількості циклів перезапису спостерігається часткова полімеризація плівки і погіршення відношення сигнал – шум.

Перевагою магнітних плівок є висока швидкодія, яка забезпечує тривалість всього циклу запис – зчитування – стирання не більше 50 мс. Їх недолік – низька дифракційна ефективність, що пов'язана зі слабо вираженим магнітооптичним ефектом.

Сегнетокерамічні матеріали придатні для об'ємного запису голограм. Так, в кристалах ніобіта літія, легованих атомами заліза, вдається записати більше як 100 голограм при послідовному повертанні кристала на незначні кути відносно опорного променя. Проте для більшості нелегованих сегнетокерамічних матеріалів час збереження інформації відносно невеликий ($10^{-3} - 10^{-2}$ с.).

1.8.12 Застосування структур метал – діелектрик – напівпровідник в інтегральній оптиці

Структури метал – діелектрик – напівпровідник – електрооптичний матеріал МДН – ЕОМ представляють собою новий тип оптоелектронних структур, за допомогою яких стає можливою реалізація просторово – часової модуляції світла, перетворення і обробка оптичних зображень. Дані структури – багатофункціональні елементи, які виконують операції підсилення і перетворення оптичних інформаційних сигналів. На їх основі можна розробляти перетворювачі ПЧ – зображення в видиме, створювати корелятори оптичних зображень. Структура МДН – ЕОМ конструктивно складається з шару ЕОМ і прилягаючої частини МДН і містить шари, які за призначенням аналогічні до шарів фотопровідника і ЕОМ. Відрізняють структури МДН – ЕОМ від випромінюючих і відбивних структур (рис. 1.76). Оскільки всі ЕОМ 4 високоомні, то шар напівпровідника з обох сторін ізольований від електродів 1. Ці структури несиметричні, тому що електрофізичні властивості діелектриків МДН і ЕОМ частин рівні.

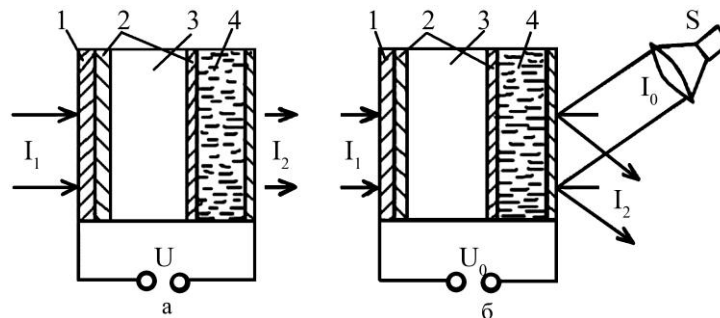


Рисунок 1.76- Структури МДН – ЕОМ

Як правило, використовують МДН структури на основі кремнію з рівноважною концентрацією носіїв $n \approx 10^{14} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ і рухливістю $\mu = 1200 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Діелектриком служить шар SiO_2 ($\rho \approx 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $b=4$, електрична міцність $E_M \approx 5 \cdot 10^7 \text{ В/см}$), або композиція з двох шарів Si_3N_4 і SiO_2 . Товщина шару діелектрика приблизно 1 мкм. Для створення прозорих електродів застосовують Al і Cr . До електрооптичних матеріалів відносять цинкосульфідні електролюмінофори, леговані Cu або Mn ; сублімат – фосфори; світло випромінюючі р – п переходи; електрооптичні сегнето – кераміки. Структури МДН – ЕОМ працюють в динамічному режимі. При відсутності світлового потоку, спад зовнішньої напруги відбувається в основному на шарі напівпровідника. Під дією світла в напівпровіднику появляются носії зарядів, які під дією поля концентруються біля границь напівпровідник – діелектрик і напівпровідник – ЕОМ. В результаті цього поле в напівпровіднику екранується, а напруга на шарі ЕОМ зростає. Коли рівень напруги на ЕОМ досягає порога переключення оптичних характеристик $U_{\text{пор}}$, відбувається модуляція вихідного світлового потоку. При відключенні напруги структура повертається у вихідне положення. Ефект модуляції можна оцінити по зміні оптичної густини:

$$U = lq I_o / I_m, \quad (1.50)$$

де I_0 – вихідна інтенсивність світла; I_M – вихідна інтенсивність світлового потоку після модуляції.

Функціонування структури МДН – ЕОМ описується співвідношеннями:

$$I_{\text{вих}} = \begin{cases} I_0, & U_{\text{ЕОМ}} < U_{\text{пор}}; \\ I_M, & U_{\text{ЕОМ}} > U_{\text{пор}}. \end{cases}$$

де $U_{\text{ЕОМ}} = f(Z_{\text{ЕОМ}}, Z_n, Z_0)$ – функція опору шарів ЕОМ, напівпровідника і діелектрика.

Одним із перспективних середовищ для перетворювачів, здатних здійснити просторову модуляцію випромінювання когерентного джерела, є рідкі кристали. На їх основі розроблено оптичні керовані транспаранти, що представляють собою елементну базу оптичних Фур'є-процесорів і кореляторів.

1.9 Кріогенна електроніка

Кріогенна електроніка (кріотроніка) - галузь електроніки, що займається питаннями застосування електронних явищ, що відбуваються в різних речовинах при низьких температурах. Розвиток кріоелектроніки пов'язаний головним чином з тим, що при температурах, нижчих за визначену (критичну), у деяких речовинах спостерігається явище надпровідності, тобто їхній електричний опір практично стає таким, що дорівнює нулю. Явище надпровідності було відкрито у 1911 р. голландським фізиком Х. Камерлінг-Оннесом. Теоретичне пояснення цього явища на основі квантової фізики дали вперше в 1957 р. американські вчені Д. Бардін, Л. Купер, Д. Шриффер та радянський академік Н. Н. Боголюбов. Перехід від кінцевого значення опору до надпровідності відбувається стрибком при критичній температурі. Але стан надпровідності зникає при дії на надпровідник магнітного поля визначеної напруженості або коли сила струму в надпровіднику перевищує деяке максимальне значення.

Найпростіший, історично перший кріогенний перемикальний прилад - *кріотрон*, являє собою надпровідник 1 (рис. 1.77), який можна переводити зі стану з нульовим опором у стан з кінцевим опором, впливаючи магнітним полем. Поле створюється струмом, що протікає в іншому, керуючому, надпровіднику 2, що виготовляють з металу з більш високою критичною температурою, ніж у керованого провідника 1. Більш досконалим є плівковий кріотрон (рис. 1.78), в якому перпендикулярно один до одного розташовані керована 1 і керуюча 2 плівки, розділені шаром діелектрика 3. Товщина плівок близько 1 мкм, ширина - 1 - 10 мм. Керуюча плівка робиться більш вузькою. Обидві плівки перебувають у надпровідному стані, але якщо пропустити через керуючу плівку струм, не менший від деякого критичного значення, то магнітне поле цього струму порушить надпровідність керованої плівки на ділянці перетинання плівок, і тоді опір керованої плівки стане більше нуля. Можливі й інші конфігурації кріотронів.

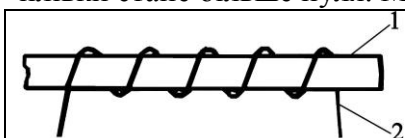
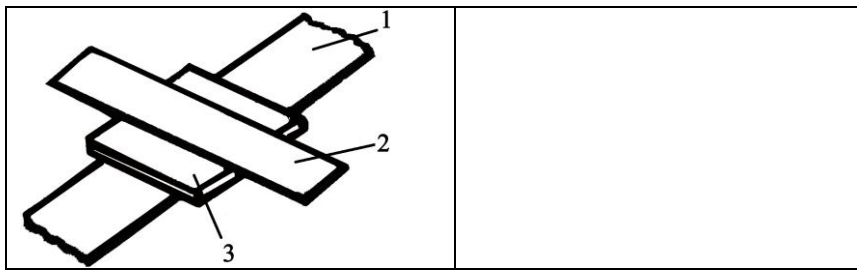


Рисунок 1.77 – Дротовий кріотрон

Рисунок 1.78 – Плівковий кріотрон



Основне застосування кріотронів - це перемикальні елементи швидкодіючі ЕОМ. Два різко різних стани керованого провідника відповідають знакам 0 і 1. Час перемикання (переходу кріотрона з одного стану в інший) складає малі частки мікросекунди. Тому швидко-дія ЕОМ на кріотронах дуже висока. Важливо також, що на керування кріотроном витрачається дуже мала потужність. Плівкові кріотрони можуть бути зроблені дуже малого розміру, і тоді на площі в 2 см² розміща-ються тисячі кріотронів. Саме плівкові кріотрони можливо застосовувати в мікроелектронних пристроях.

На велику увагу заслуговує отримання в замкнутому надпровідному контурі постійного струму, що може тривалий час протікати за відсутності джерела ЕРС. Такий струм можна, наприклад, збудити методом електромагнітної індукції в металевому кільці, що перебуває у надпровідному стані. Унаслідок того, що опір надпровідного кільця та втрати на нагрівання дорівнюють нулю, струм у кільці існує десятки днів практично без послаблення. На використанні цього явища ґрунтується робота запам'ятовувальних пристроїв, у яких відсутність струму відповідає нулю, а наявність струму - одиниці. Можна також для запам'ятовування знаків 0 і 1 використовувати у надпровідному замкнутому контурі струми різних напрямків.

Особливий інтерес викликають кріогенні прилади, дія яких ґрунтується на ефекті, відкритому в 1962 році англійським ученим Б. Джоозефсоном. Суть ефекту Джоозефсона полягає в наступному. Якщо два надпровідники розділені дуже тонким (менше 1 нм) шаром діелектрика, то через цей шар може протікати постійний струм, хоча спадання напруги на цій ділянці буде дорівнює нулю. У цьому випадку через тонкий шар діелектрика протікає своєрідний тунельний струм. Під дією магнітного поля з визначеною напруженістю, якщо струм перевищить деяке граничне значення, ефект Джоозефсона зникне, тобто струм узагалі припиниться. Таким чином, на ефекті Джоозефсона можуть працювати кріогенні перемикальні елементи. Час перемикання джоозефсоновських елементів дуже малий (до 10-11 с). На таких елементах можуть бути побудовані надшвидкодіючі ЕОМ з малим споживанням потужності і великим числом арифметичних операцій (декілька мільярдів за секунду).

Слід відзначити, що наднизькі температури викорис-товуються також у різних радіоелектронних пристроях для зниження втрат у них. Створено, наприклад, коливальні системи (резонатори) з надвисокою доброт-ністю, що сягає до сотень тисяч і навіть мільйонів, коаксіальні кабелі з мізерно малим загасанням, резонансні фільтри з надвисокою вибірковістю. Дуже важливо і те, що при низьких температурах знижується рівень власних шумів. Це сприяє підвищенню чутливості радіоприймальних пристроїв і дозволяє приймати дуже слабкі сигнали, наприклад від космічних об'єктів. При звичайних температурах приймання таких сигналів вкрай утруднене, тому що вони значно слабкіше власних шумів вхідної частини радіоприймального пристрою.

Основним недоліком усіх кріогенних пристроїв є необхідність створення для їх роботи наднизьких темпера-тур. До останнього часу для цієї мети використовувався рідкий гелій, у якого температура переходу з газоподібного стану в рідкий складає 4 К. Холодильні установки для підтримки такої низької температури складні та громіздкі. Це обмежує практичне застосування кріогенної апаратури. Нові перспективи з'явилися перед

кріоелектронікою у зв'язку з відкриттям високотемпературної надпровідності. У 1987 році було встановлено, що деякі речовини, зокрема металооксидні з'єднання типу кераміки, можуть ставати надпровідниками при значно більш високих температурах. Це означає, що для таких надпровідників замість дорогого рідкого гелію можна використовувати рідкий азот, у якого критична температура складає 77 К. Рідкий азот виробляється у великих кількостях і відносно дешевий. Тому в електроніці більш ефективним є використання високо-температурних надпровідників.

1.10 Діелектрична електроніка

З точки зору теорії розсіювання носіїв заряду будь-яке неметалеве тверде тіло в товстому шарі має властивості напівпровідника, в тонкому - діелектрика. Ефекти, які пов'язані з протіканням емісійних струмів у неметалевих твердих тілах, не вивчаються ні фізикою напівпровідників, ні фізикою діелектриків. Закономірності фізичних явищ, приладові та схемні розробки на основі вищезазначених ефектів, складають зміст нового розділу фізики твердого тіла і електроніки - діелектричної електроніки.

Якщо між двома металевими електродами помістити діелектричну плівку товщиною 1 - 10 мкм, то електрони, які емігрують з металу, заповнять всю товщину плівки та напруга, яка прикладається до такої системи, викличе струм у діелектрику.

До приладів діелектричної електроніки належать діоди та транзистори, які мають характеристики, аналогічні електровакуумним приладам. Їх перевагами є мікромініатюрність, мала інерційність, низький рівень шумів, мала чутливість до зміни температури і радіації.

1.11 Біоелектроніка

Біоелектроніка (біоніка) - це один з напрямів біоніки, який вирішує задачі електроніки на основі аналізу структури та життєдіяльності живих організмів. Біоелектроніка вивчає нервову систему людини та займається моделюванням нервових клітин (нейронів та нейронних сіток) для подальшого формування нових елементів та пристроїв обчислювальної техніки, автоматики і телемеханіки.

Дослідження нервової системи показали, що вона має ряд властивостей та переваг перед найсучаснішими обчислювальними пристроями. Основні з них: удосконалене сприймання зовнішньої інформації незалежно від форми, в якій вона надходить; висока надійність, значно вища, ніж у технічних систем; мікромініатюрність елементів (при кількості елементів 10^{10} - 10^{11} об'єм мозгу людини складає 1,5 дм³); економічність роботи (споживання енергії мозгом людини не перевищує декількох десятків ват); високий ступінь самоорганізації, швидке пристосування до нових ситуацій, до зміни програм діяльності.

Нервова система складається з клітин - нейронів. Нейрони (рис. 1.79), де б вони не знаходились, мають однакову структуру і приблизно однакові логічні характеристики.

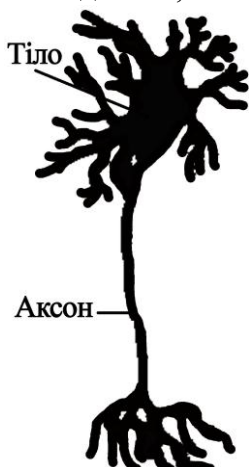


Рисунок 1.79 – Схема нейрона

Вони є універсальними логічними елементами. На основі нейронів будуються нейронні мережі, які свідчать про той неймовірний факт, що з допомогою одного елемента можна побудувати систему, яка може виконувати найскладніші задачі. Для реалізації складних нейронних мереж достатньо мати нейроподібний елемент, який має

аналогово-логічні властивості і за своїми функціональними можливостями наближається до біологічних рецепторних і центральних нейронів. Дослідження показали, що модель нейрона може бути виконана у вигляді двох інтегральних мікросхем на МДН-транзисторах. На сучасному етапі проводяться інтенсивні наукові дослідження в різних напрямках біоелектроніки.