

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Л.В.Ододворець

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОНІКИ

Конспект лекцій



Суми 2022

Конспект лекцій з дисципліни «Сучасні проблеми електроніки» для студентів спеціальностей 014 - Середня освіта (Фізика) та 171 - Електроніка / Укладач: Л.В.Однорець. – Суми: СумДУ, 2022. – 54 с.

Розділ 1

СУЧАСНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОНІКИ

1.1 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.).

1.2 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. 6.1), має електроди однакової площі з того самого матеріалу. Вольт-амперна

характеристика такої комірки також симетрична (рис.6.2а). У несиметричній комірниці площі електродів різні і вольт-

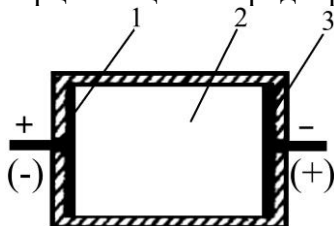


Рисунок 6.1 - Найпростіша електрохімічна комірка

амперна характеристика несиметрична (рис.6.2 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 щільною або капіляром, що з'єднує відсіки.

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 змінюються 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,

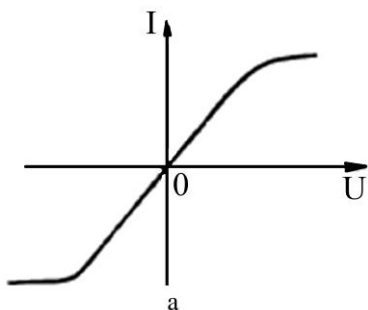
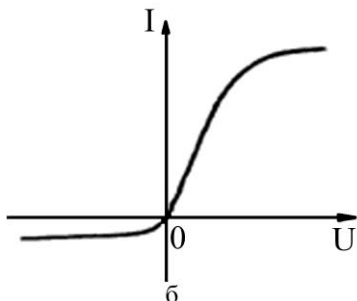


Рисунок 6.2 - Вольт-амперні характеристики симетричної (а) та несиметричної (б) електрохімічних комірок



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 10^5 Гц.

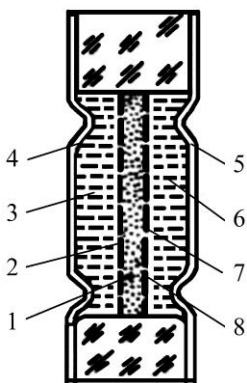


Рисунок 6.3 - Схема будови електрокінетичної комірки

Цікавими електрохімічними приладами для накопичення електричного заряду є **іонікси (іоністори)** - еквіваленти конденсаторів надвеликої ємності. Срібний і вугільний електроди розділені твердим електролітом, таким, як рубідій - іодид срібла $RbAg_4I_5$ або сульфід - іодид срібла Ag_3SI . При протіканні струму на поверхні вугільного електрода, що є 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 $+175$ °С. 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 розміщуються 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 електро-хімічних індикаторів, робота яких ґрунтується на тих чи інших фізико-хімічних процесах в електролітах.

1.3 Магнітоелектроніка

1.3.1 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).

Розрізнять декілька груп сучасних магнітних елементів: циліндричні магнітні домени; перетворювачі Холла; магніторезистори; магнітодіоди; магніотранзистори та магніотиристри.

1.3.2 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.

Зчитування інформації проводиться різними методами. Наприклад, на основну плівку наноситься петля з напівпровідника, який має магніторезистивний ефект (ефект Гауса) - зміну магнітного опору під дією

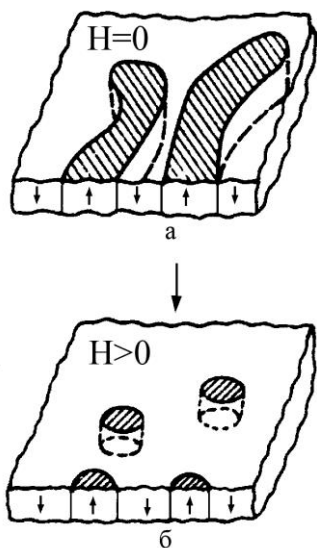


Рисунок 6.4 - Схема утворення ЦМД: а - домени за відсутності магнітного поля, б - ЦМД, які утворилися під дією зовнішнього магнітного поля

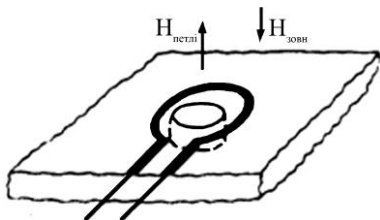


Рисунок 6.5 - Генератор доменів



Рисунок 6.6 – Магніто-резистивна петля для зчитування інформації

змінного магнітного поля (рис. 6.6). 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.

1.3.3 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.6.7). Цей ефект можна пояснити наступним чином. Якби усі електрони мали однакову середню швидкість, то при рівності сили поля і сили Лоренца вони рухалися 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 полючи і сили Лоренца. Одна з цих сил більше інший і викликає відхилення

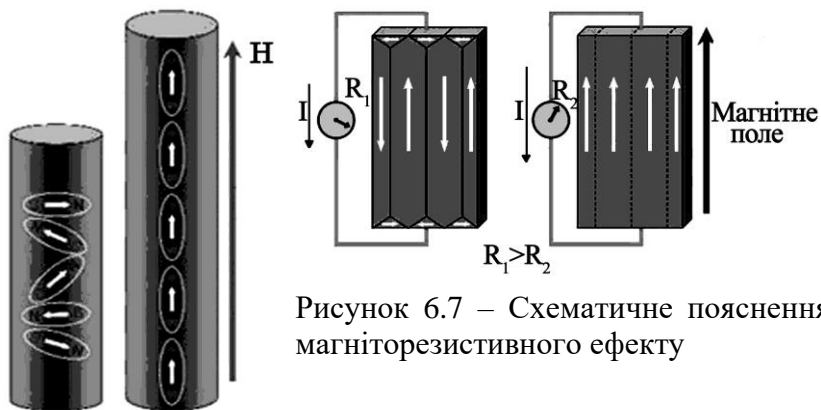


Рисунок 6.7 – Схематичне пояснення магніторезистивного ефекту

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.

1.3.4 Магніодіоди

Магніодіоди - це напівпровідникові діоди з р-п – переходом, в яких вольт-амперна характеристика змінюється під дією магнітного поля. Конструктивно магніодіод являє собою р-п-перехід з непрямою омичним контактом, між якими знаходиться область високоомного напівпровідника (рис.1.40 а). Відмінність від

традиційних напівпровідникових діодів полягає тільки в тому, що магніодіод 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-n-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.

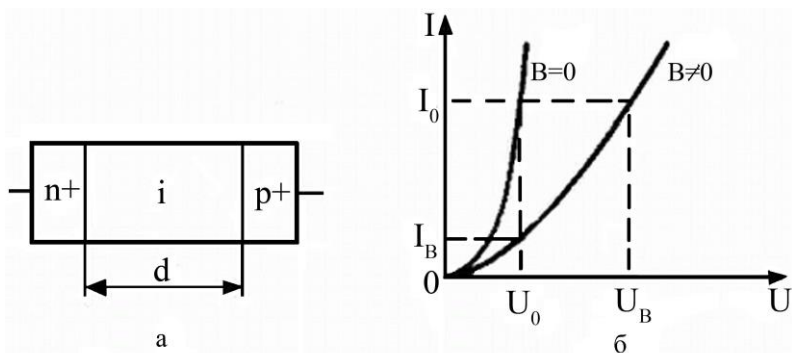


Рисунок 6.8 - Конструкція (а) і вольт-амперна характеристика (б) магнітодіода

Основним параметром магнітодіода 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 магнітодіоді при зміні магнітного поля на 1 мТл і постійному значенні струму через магнітодіод, 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 магнітодіод при зміні магнітного поля на 1 мТл і постійній напрузі:

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

Магнітодіоди 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 магнітодіодів конструюють безконтактні реле струму та манітодіодні підсилювачі з коефіцієнтом підсилення в кілька сотен для струмів до 10 А. . Схеми на магнітодіодах може також замінювати колектор в електродвигуні постійного струму.

1.3.5 Магнітотранзистори

Магнітотранзистори - 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 магнітотранзистора.

Магнітотранзистори класифікують на чотири типи: одноперехідні (ОПТ), одноколекторні (ОКТ), двохколекторні (ДМТ) та польові (ПМТ). Розглянемо кожний тип магнітотранзисторів більш детально.

1. *Одноперехідні* – магнітотранзистори, що діють на основі модуляції опору бази носіїв заряду, які інжектуються із емітера та мають S-подібну вхідну характеристику (рис.1.41).

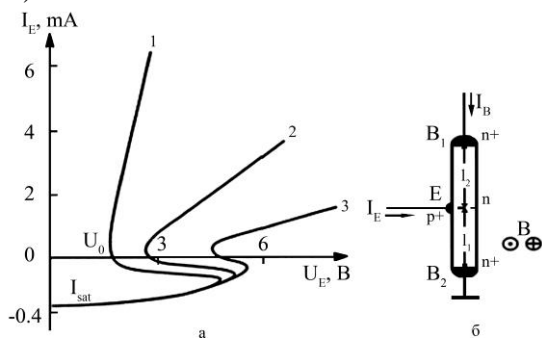


Рисунок 6.9 – Вхідна характеристика ОПТ: крива 1 – $V=0$; крива 2 – $V = 0,3$ Тл; крива 3 – $V = 0,6$ Тл

Характер кривої 1 вказує на те, що чим більше час життя інжектованих 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 інжектовані 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 i , 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 спростувати 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.1.42). 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 магніточутливість досягається при включенні ОКТ як двохполюсника (ланцюг емітер - колектор) при вимкнутій базі. В такому випадку при струмі $I_{e-k} = 0,6$ мА магніточутливість $\gamma = 2 \cdot 10^4$ В/АТл.

3. *Двохколекторні магнітотранзистори* – біполярні транзистори, в яких колектори K_1 і K_2 розміщуються симетрично відносно емітера. За відсутності магнітного поля струм емітера поділяють на дві рівні частини, які потрапляють на колектори (рис.6.10). Траєкторії електронів для цього випадку зображені суцільними лініями. Оскільки

потенціали колекторів однакові, то падіння напруги між колекторами $\Delta U=0$ і, відповідно вихідна напруга $U=0$.

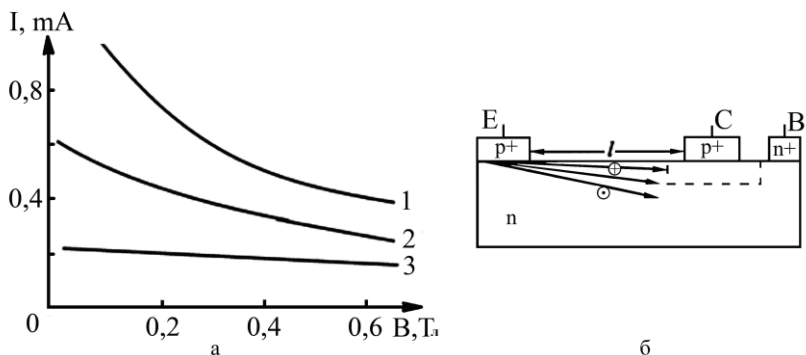


Рисунок 6.10 – Вхідна характеристика (а) та схематичне зображення руху носіїв заряду (б) в одноколекторному магнітотранзисторі: крива 1 – 25 В; крива 2 – 20 В, крива 3– 15 В

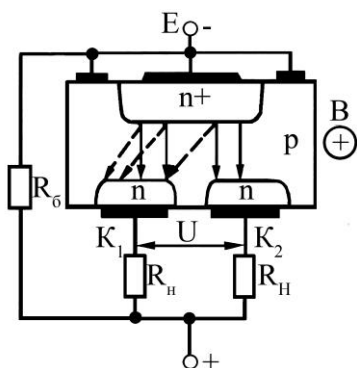


Рисунок 6.11 - Структура та схема ввімкнення ДКТ

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 (Рис.6.11). На колектор K_1 буде потрапляти більше

електронів, і його струм збільшиться, а струм колектора K_2 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.6.12). Широке застосування вони знайшли як такі, що виконують функції датчика Холла.

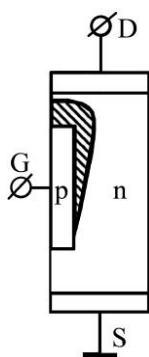


Рисунок 6.12 - Структура ПМТ з р-n-переходом: D – сток, S – витік, G - джерело

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:

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

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.

1.3.6 Магнітотиристори

Магнітотиристори – це напівпровідникові триристори типу $p-n-p-n$, в яких, в яких напругу ввімкнення можна змінювати, впливаючи зовнішнім магнітним полем. За відсутності магнітного поля магнітотиристори мають деяку середню напругу ввімкнення. Збільшуючи напруженість магнітного поля в одному напрямку, можна підвищити напругу ввімкнення, а в протилежному напрямку – знизити, тобто змінювати ВАХ магнітотиристора (рис.6.12). Емітер виконує роль аноду (A), керувальні електроди (c1, c2)

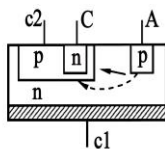
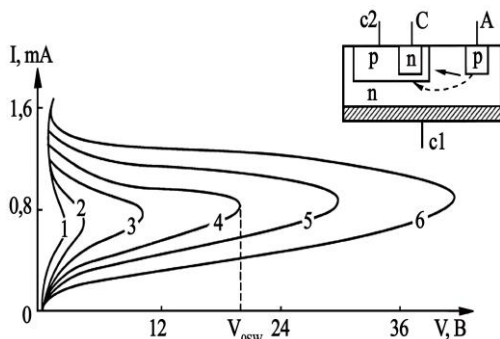


Рисунок 6.12 – ВАХ Si- магнітотиристора, відстань між p-областями 100 мкм:
 1 – $B = -1$ Тл;
 2 – $B = -0,8$ Тл;
 3 – $B = -0,4$ Тл;
 4 – $B = 0$;
 5 – $B = 0,4$ Тл;
 6 – $B = 0,8$ Тл

Розділ 2

АКУСТОЕЛЕКТРОНІКА

Акустоелектроніка - галузь електроніки, яка присвячена теорії і практиці створення пристроїв, заснованих на акустоелектронній 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, обчислювальній техніці та ряді інших галузей електроніки.

Виникнення в металі чи напівпровіднику струму або електрорухомої сили під дією ультразвукових хвиль називають **акустоелектричним ефектом**. Акустоелектричний ефект викликається дією або об'ємних ультразвукових 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 згасають при віддаленні від межі. Останнім часом широко застосовуються акустоелектронні прилади на поверхневих акустичних хвилях: лінії затримки, полосові фільтри, резонатори, датчики. Принцип дії таких приладів показано на рисунку 6.13. 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).

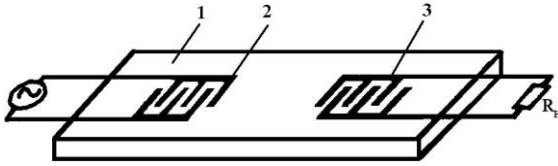


Рисунок 6.13 - Принцип будови акустоелектронного приладу на поверхневих акустичних хвилях

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 приладі, 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 акустоелектронний прилад вносить велике загасання. Тому важливою проблемою при створенні високоефективних акустоелектронних 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 переключувань вихідного сигналу і погіршення параметрів приладу. 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 різної: 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.

Розділ 3 ОПТОЕЛЕКТРОНІКА

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 аналогі 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).

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 фотоєфекта. **Зовнішнім фотоєфектом** називається вихід вільних електронів з поверхневого шару фотокатода в зовнішнє середовище під дією світла. **Внутрішнім фотоєфектом** 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.

Фоторезистори - це напівпровідникові резистори, які змінюють свій опір під впливом світлового потоку (рис.6.14). 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.

Позначення фоторезисторів ранніх випусків: 1 елемент - літери, які означають тип приладу (ФС - фотоопір), 2 елемент - літера, яка означає матеріал світлочутливого елемента (А - сурнистий свінець, К - сурнистий 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.

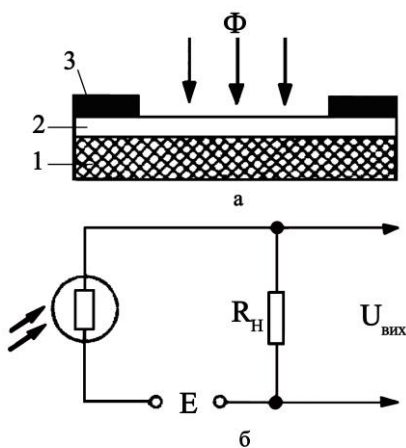


Рисунок 6.14 -
Принцип будови та
схема ввімкнення
фоторезистора

Позначення сучасних

фоторезисторів: 1 елемент - літери, які означають тип приладу (СФ - опір фоточутливий), 2 елемент - цмфра, 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:

1. Темновий струм (I_m) - струм, який проходить через фоторезистор при робочій напрузі через 30 с після зняття освітленості 200 лк.
2. Світловий струм (I_c) - струм, який проходить через фоторезистор при робочій напрузі та освітленості 200 лк від джерела світла з кольоровою температурою 2850 К.
3. Температурний коефіцієнт фотоструму ($TK I_\phi$) - зміна фотоструму при зміні температури фоторезистора на 1 °С.
4. Робоча напруга (U_ϕ) - напруга, яку можна прикласти до фоторезистора при тривалій експлуатації без зміни його параметрів більше за встановлені.
5. Темновий опір (R_m)- опір фоторезистора при температурі 20°С через 30 с після зняття освітленості 200 лк.
6. 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.
7. Постійна часу (τ) - час, продовж якого фотострум змінюється в e разів при його освітленні.

8. 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.
9. Опір ізоляції (R_i).
10. Довгохвильова межа (λ).

Основними характеристиками фоторезисторів є такі:

1. Вольт-амперна ($I = f(U)$) - залежність світлового, темного або фотоструму (при $\Phi = const$) від прикладеної напруги (рис.1.49).
2. Світлова або люкс-амперна ($I = f(E)$) - залежність фотоструму від світлового потоку, який падає або освітленості (при $U = const$).
3. Спектральна ($I = f(\lambda)$) - залежність фотоструму від довжини хвилі світлового потоку (при $U = const$).
4. Частотна ($I_{\Phi} = f(F_{\Phi})$) - залежність фотоструму від частоти модуляції світлового потоку (при $U = const$).

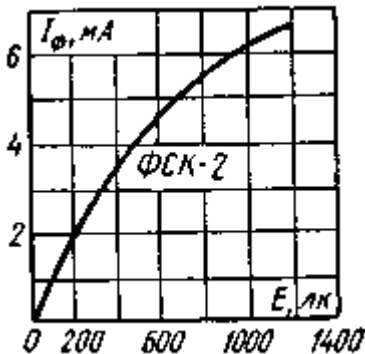


Рисунок 6.15 – Вольт – амперна характеристика фоторезистора ФСК-2

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.

Фотодіоди - це напівпровідникові діоди, в яких використовується внутрішній фотоефект. 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). Другий тип режиму - вентильний (фотогенераторний). На відміну від вентильного 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).

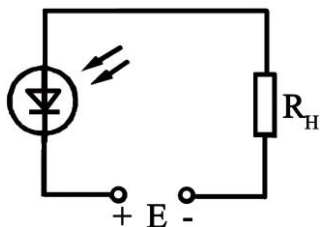


Рисунок 6.16 - Схема ввімкнення фотодіода для роботи у фотодіодному режимі

Основні характеристики фотодіодів: вольт-амперна ($I = f(U)$) - залежність світлового, темного або фотоструму (при $\Phi = \text{const}$) від прикладеної напруги (рис. 1.50); енергетична ($I_{\Phi} = f(\Phi)$) - залежність фотоструму від світлового потоку (при $U = \text{const}$) - лінійна, мало залежить від напруги (рис.6.16).

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.

Фототранзистори - це напівпровідникові прилади з двома р-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.

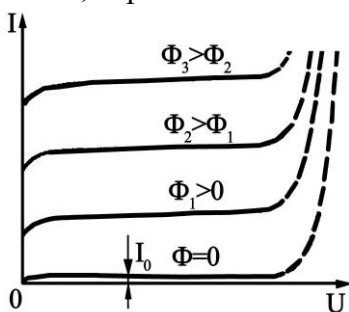


Рисунок 6.17 - Вольт-амперні характеристики фотодіода для фотодіодного режиму

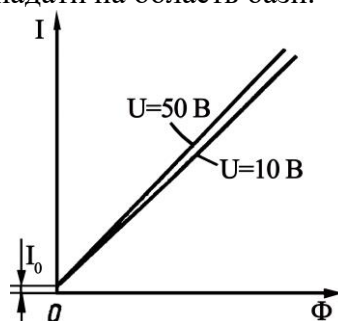


Рисунок 1.51 - Енергетичні характеристики фотодіода

Напруга живлення подається на емітер і колектор, його колекторний перехід виявляється закритим, а емітерний - відкритим. База залишається вільною (рис. 6.17). 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.

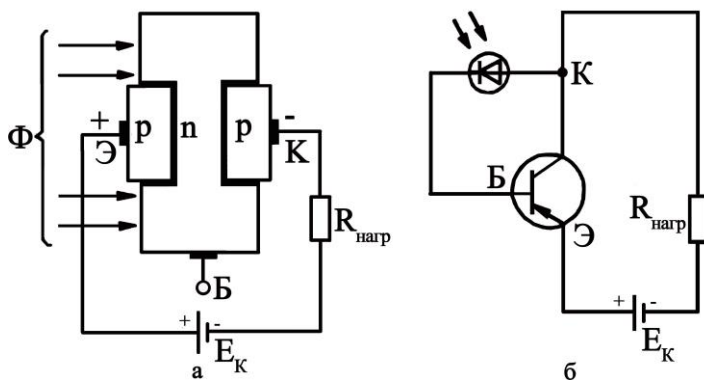


Рисунок 6.18 - Структурна схема біполярного фототранзистора з вільною базою (а) і схема ввімкнення фототранзистора (б)

Струм колектора освітленого фототранзистора виявляється досить великим; відношення світлового струму до темного 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, автоматиці 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.

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 р₂ і n₁ через «вікно» в його корпусі (рис. 6.19), 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 р₂ і n₁ 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 10⁸ Ом (у закритому); час переключення складає величину 10⁻⁵ - 10⁻⁶ с.

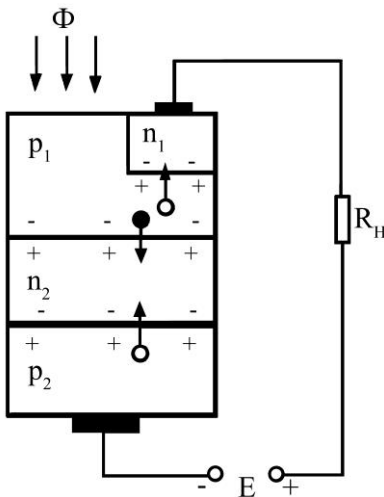


Рисунок 6.19 - Структура фототиристора

Зі світлової характеристики $I_{np.} = f(\Phi)$ при $U_{np.} = const$ (рис.1.54 а) видно, що після ввімкнення фототиристора

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

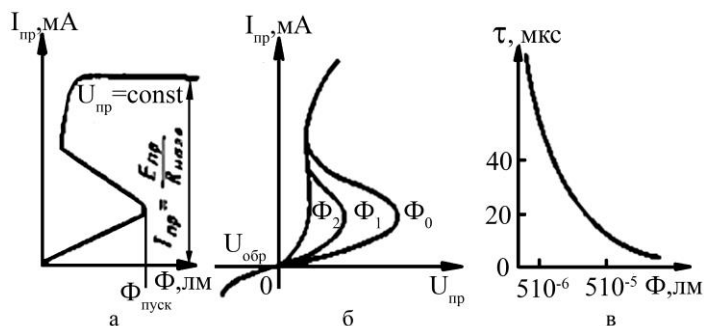


Рисунок 6.20 - Характеристики фототиристора: а - світлова, б - ВАХ, в - залежність часу від світлового потоку

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 високовольних перетворювачах. Найчастіше фототиристори використовують для комутації світловим сигналом потужних електричних сигналів.

Розділ 4

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, 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, 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

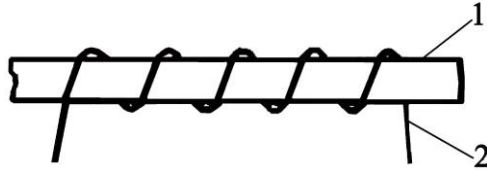


Рисунок 4.1 - Дротовий кріотрон

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.

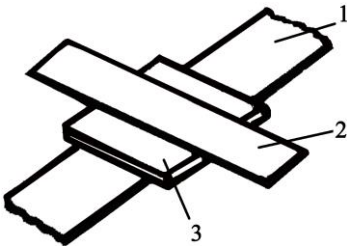


Рисунок 4.2 - Плівковий кріотрон

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 швидкодія 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 см^2 розміщаються 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. Джозефсоном. Суть ефекту Джозефсона 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 Джозефсона зникне, тобто струм узагалі припиниться. Таким чином, на ефекті Джозефсона можуть працювати кріогенні перемикальні елементи. Час перемикання джозефсоновських 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 використовуються також у різних радіоелектронних пристроях для

зниження втрат у них. Створено, наприклад, коливальні системи (резонатори) з надвисокою добротністю, 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 криогенних пристроїв є необхідність створення для їх роботи наднизьких температур. 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 криогенної апаратури. Нові перспективи з'явилися перед криоелектронікою 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 високотемпературних надпровідників.

4.3 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.

4.4 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 $1,5 \text{ дм}^3$); 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. 6.23), де б вони не знаходились, мають однакову структуру і приблизно однакові логічні характеристики. 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

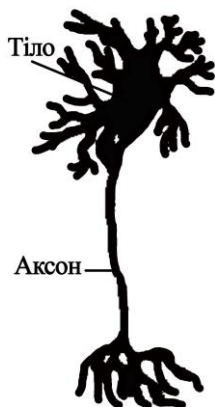


Рисунок 4.3 – Схема нейрона

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.

Розділ 5 ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СИСТЕМИ І ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ

5.1 Застосування волоконно-оптичних систем

Коротко зупинюся на історії створення волоконно-оптичних приладів, сучасному стані розвитку волоконної оптики та галузях застосування для чіткого визначення актуальності вивчення даної теми.

- **Волоконна оптика** – це галузь оптоелектроніки, яка вивчає фізичні явища, що виникають в оптичних волокнах та прилади і системи, до складу яких входять компоненти на основі оптичних волокон.

Задачі сучасних дослідників у цій галузі – це проектування і розробка надчутливих волоконно-оптичних сенсорів фізичних величин, ліній волоконно-оптичного зв'язку з наднизькою дисперсією.

Принцип передачі світла усередині оптоволокна був вперше продемонстрований за часів королеви Вікторії в 1870 році англійським фізиком Джоном Тіндалем на прикладі світла через потік води. При цьому він використовував той же ефект повного внутрішнього віддзеркалення, на якому заснований принцип дії сучасних волоконних світлопроводів. Але якщо по такому світлопроводу направити просто "біле" світло, то воно швидко затухне.

Ефект Тиндала – при проходженні світлових променів через середовище, в якому взвішені мілкі тверді частинки, наприклад, пильне або задимлене повітря, колоїдні розчини, мутне скло, ефект розсіювання зменшується по мірі змінення спектральної окраски променів від фіолетово-синьої до жовто-червоної частини спектра.

Лише такі властивості лазерного випромінювання, як монохроматичність і когерентність, зумовили можливість поширення його по діелектричному оптоволокну з мінімальними втратами.

Застосування волоконно-оптичних приладів, поліпшення характеристик кабельних і волоконно-оптичних систем спричинило підвищення якості вже існуючих послуг зв'язку і створення цілого ряду нових:

- можливість користування всесвітньою мережею Інтернет і електронною поштою з доступом до приватних осіб, що мають ПК;
- формування інтелектуальних мереж зв'язку (комп'ютерна телефонія);
- створення безпечних систем освітлення архітектурних об'єктів і важкодоступних зон освітлення (наприклад, експонатів музеїв та медичних барокамер), декоративних систем освітлення (реклама і штучні ялинки);
- використання оптичних волокон (ОВ) в гідрофонах сейсмічних або гідролокаційних приладів (наприклад, системи з гідрофонами на основі більше 100 сенсорів для нафтовидобувній промисловості);
- створення лазерних мікроскопів;
- виробництво оптоволоконних сенсорів температури і тиску, малий розмір і фактична відсутність необхідності в електричній енергії яких, дає оптоволоконним сенсорам перевагу перед традиційними електричними;
- застосування ОВ в медичній техніці для формування зображення і дослідження внутрішніх органів людини через невеликій отвір (ендоскопія).

Темпи розвитку волоконної оптики і оптоелектроніки на світовому ринку випереджають всі інші галузі техніки і складають ~40 % у рік. У ряді країн, серед яких США,

Англія, Японія, Франція, Італія й інші, вже зараз при будівництві споруджень зв'язку використовуються в основному оптичні кабелі. Вони займають домінуюче місце на мережах міжміського і міського зв'язку. Про масштаби розвитку волоконно-оптичних ліній зв'язку свідчать обсяги виробництва оптичного волокна в США. За останні 5 років було виготовлено близько 100 млн. км волокна. Така кількість дозволила б зробити 2500 витків довкола всієї земної кулі .

5.2 Фізичні принципи розповсюдження світла по оптичним волокнам

Оптоволоконо́ або оптичне волокно — це скляна або пластикова нитка, яка використовується для перенесення світла завдяки повному внутрішньому віддзеркаленню. Джгут, сплетений із тисяч оптичних волокон називається **світловодом**. Його діаметр складає до декількох десятків міліметрів.

Конструктивно ОВ складається з трьох частин: центральної частини - серцевини з показником заломлення n_1 ; оболонки з показником заломлення n_2 ($n_2 < n_1$); захисного покриття (шар полімеру - акрилат).

З метою запобігання впливу зовнішніх факторів на оптичні властивості оптоволокна (волога, подряпини, мікротріщини), навколо оптичної оболонки наносяться шари полімеру (акрилат).

В реальних ОВ $n_1 \sim 1,48$, а $n_2 \sim 1,46$. Різні сорти скла 1,6 – 2,04, кварц 1,54.

Якщо ядро та оптична оболонка виготовлені з одного матеріалу (наприклад, чисте кварцеве скло), зміна показника заломлення досягається підбором спеціальних домішок, які вводяться у чистий розплав кварцу.

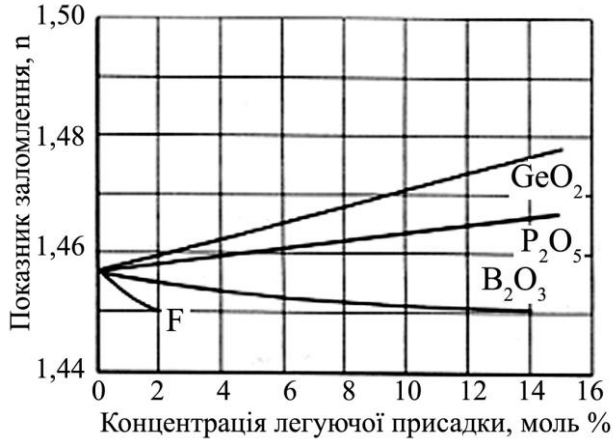


Рисунок 5.1 - Показники заломлення кварцового скла з різними легуючими присадками

Другий варіант - ядро оптоволоконна також може виготовлятися із скла, а оптична оболонка - з пластику (PCS-оптоволоконно).

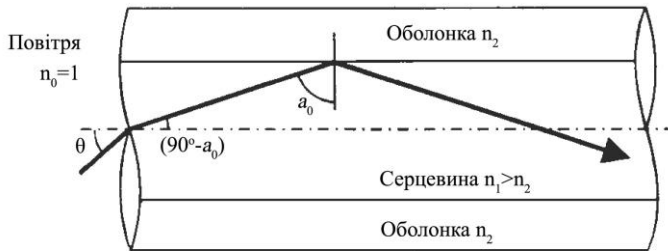


Рисунок 5.2 – Хід променів в оптоволоконі. α_0 - кут повного відзеркалення

Показник заломлення серцевини може бути постійним або змінюватися.

Залежно від закону, за яким змінюється показник заломлення серцевини n_1 , ОБ класифікують:

- ОБ із ступінчастими профілями показників заломлення:

постійним показником заломлення в серцевині $n_1 = \text{const}$ та різким зменшенням показника заломлення на межі серцевини і оболонки ($n_2 \ll n_1$);

- ОБ із градієнтними профілями показників заломлення:

ОБ, в якому профіль показника заломлення постійно змінюється в серцевині (як функція відстані від осі) $n_1 = f(d)$. Кутова апертура 3,370.

ОБ характеризується двома важливими параметрами:

- 1) Загасанням (втрати на поглинання і розсіювання)
- 2) Дисперсією.

Загасання обумовлене:

- 1) наявністю у склі домішок іонів Me перехідної групи: Fe^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} , іонів гідроксильної групи OH^- ;
 - 2) Флуктуаціями показника заломлення;
 - 3) Розсіюванням на неоднорідностях, розміри яких спів мірні з довжиною хвилі;
 - 4) Розсіюванням через різноманітні порушення геометрії ОБ в процесі виробництва:
- мікровигини при нанесенні захисного покриття;
 - страти на зеднання (стикові втрати);
 - некруглість оболонки, неконцентрічність оболонки і серцевини;
 - механічна втома;
 - утворення мікротріщин внаслідок впливу вологи.

Таким чином, рівень втрат в ОВ – коефіцієнт загасання:

$$\alpha = \frac{A}{L}.$$

A – загальні втрати енергії в ОВ, дБ;

L – довжина ОВ, км.

Дисперсія визначається основними факторами: різницею швидкостей розповсюдження світлових потоків; властивостями матеріалу ОВ.

У реальних волоконно-оптичних лініях мінімуми поглинання припадають на довжину хвилі 1300 і 1500 нм. При довжині хвиль від 1150 нм до 1300 нм дисперсія швидкостей розповсюдження різних довжин хвиль мінімальна. Залежність дисперсії від довжини хвилі показана на рисунку 3

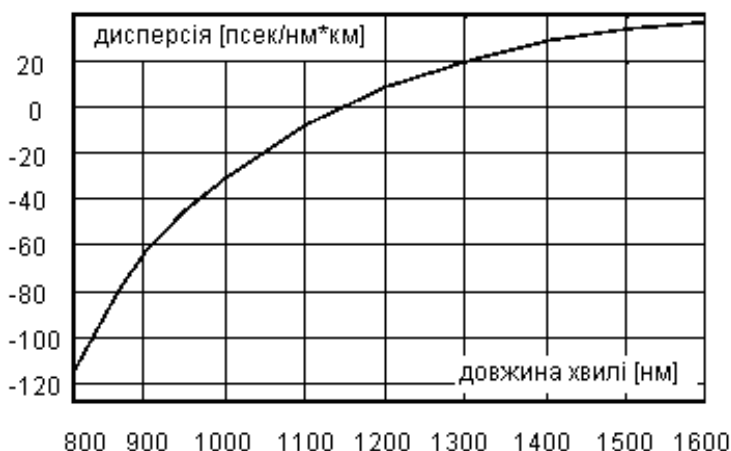


Рисунок 5.3 - Залежність дисперсії від довжини хвилі [2]

Залежність смуги пропускання волокна від його довжини приведена на рисунку 9.4.

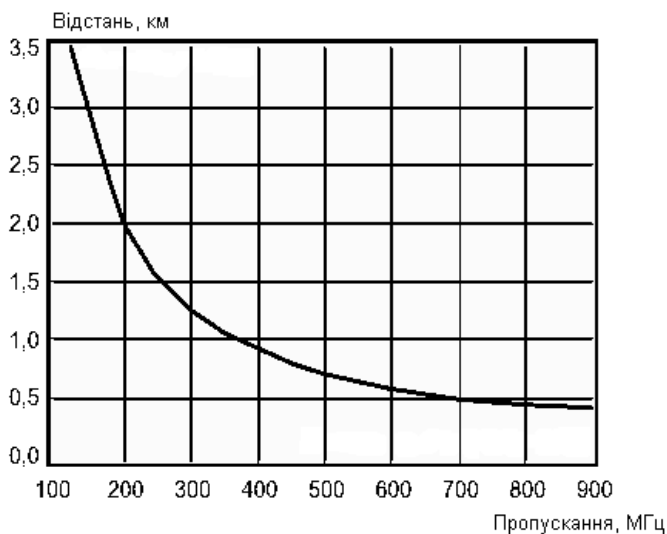


Рисунок 5.4 - Залежність смуги пропускання волокна від його довжини

5.3 Конструктивно-технологічні особливості оптичних волокон (ОВ) та світловодів

На відміну від радіосистем, у ВОЛЗ хвиля не поширюється у вільному просторі, а концентрується в самому об'ємі ОВ і передається по ньому в заданому напрямі (Рис.9.1). Передача сигналу по ОВ здійснюється за рахунок віддзеркалень світлової хвилі від границі серцевини і оболонки, які мають різні показники заломлення n_1 і n_2 .

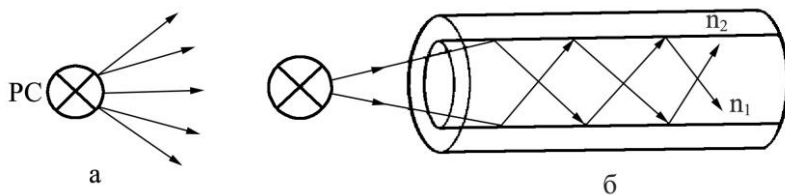


Рисунок 5.5 - Процес передавання сигналів: а – радіозв'язок; б – волоконно-оптичний зв'язок

На даний час при проектуванні та фізичній реалізації ВОЛЗ використовують багатожильні кабелі. Світло ($\lambda \cong 1300 \div 1500$ нм) вводиться в ОВ діаметром $D < 100$ мкм за допомогою світловипромінюючого діода або напівпровідникового лазера. Кабель може містити багато волокон, наприклад 8 як на рисунку 9.6.

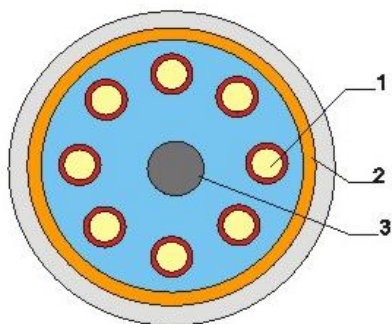


Рисунок 5.6. Перетин восьмижильного оптичного кабелю: 1 – оптичне волокно; 2 – сталева оплітка; 3 – сталевий трос

У центрі кабелю розміщується сталевий трос, який використовується при прокладенні кабелю. Із зовнішньої сторони кабель захищається від пацюків сталевую

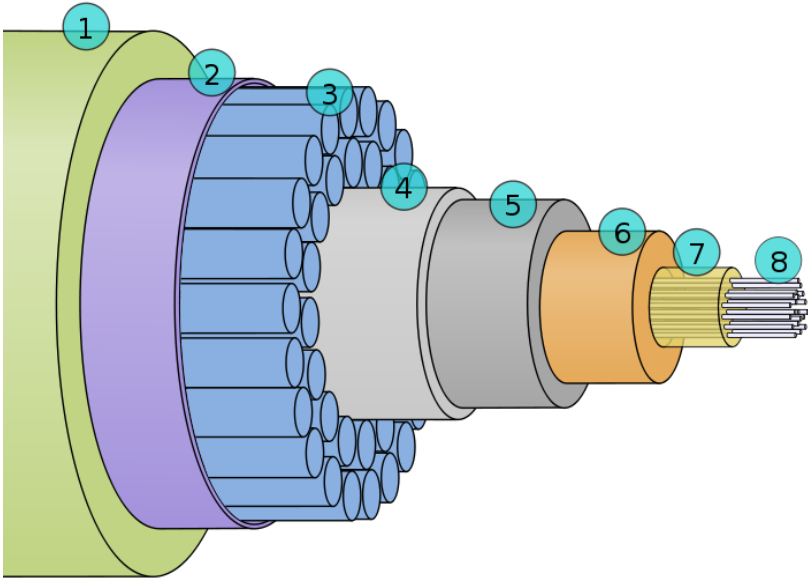


Рисунок 5.7 - Поперечний переріз підводного оптоволоконного кабелю : 1 – поліетилен; 2 – стрічка “мілара”; 3 – переплетені металеві (сталеві) провуда; 4 – алюмінієвий водний бар’єр; 5 – полікарбонат; 6 – мідна або алюмінієва труба

опліткою і герметизується еластичним полімерним покриттям. Додатково для приклада можна привести рисунок поперечного перерізу підводного оптичного кабелю.

До основних переваг ОВ можна віднести наступні:

- економія кольорових металів;
- широкопasmова можливість передачі великого потоку інформації (декілька тисяч каналів);
- малі втрати і відповідно великі довжини ділянок трансляцій (30-100 км.);
- малі габаритні розміри і маса (у 10 разів менше, ніж у електричних кабелів);

- висока захищеність від впливу зовнішніх фізичних полів; надійна техніка безпеки (відсутність іскріння і короткого замикання).

5.5 З'єднувачі для оптичних волокон

З'єднувачі для оптичних волокон мають конструкцію, показану на рис.8 і виготовляються з кераміки. Втрата світла в з'єднувачі може складати 10-20%, але якщо з'єднувати оптичні волокна методом зварювання, то втрати складуть не більше 1-2%. Окрім з'єднувачів і зварювання існує також техніка механічного зрощення волокон, яка характеризується втратами близько 10%.

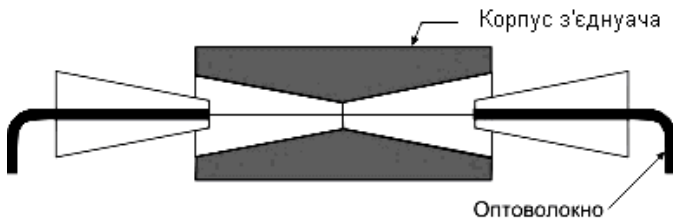


Рис.5.9 – Схема оптичного роз'єму

Використовуючи оптичні волокна можна створювати не тільки кільцеві структури. Можлива навіть побудувати фрагмент мережі, який по характеру зв'язків буде еквівалентний кабельному сегменту або хабу. Схема такого фрагмента мережі представлена на рис.9.9. Базовим елементом цієї субмережі є прозорий циліндр, на один із торців якого підключаються вихідні волокна всіх передавачів інтерфейсів пристроїв, що становлять субмережу. Сигнал з іншого торця через волокна поступає на вхід фотоприймачів інтерфейсів.

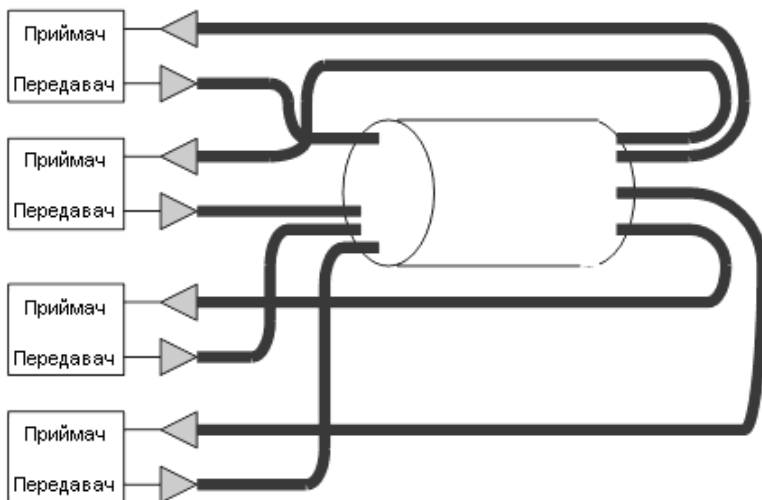


Рисунок 5.10 – Схема пасивного оптоволоконного хаба

5.7 Сучасний стан і перспективи розвитку волоконної оптики

Оптичному волокну вже більше 50 років, але до сих пір відкриваються його досі невідомі властивості. Вчені університету штату Огайо з'ясували, що оптоволоконно може бути в півтора рази міцніше, ніж вважалося раніше.

Найпопулярнішим типом скла для виробництва волокон є так званий E - glass. Цей матеріал був створений в 1950 році спеціально для потреб електроніки. Тепер він використовується для додавання міцності виробам з пластику - від душових кабін до інтер'єру автомобілів. Інші види скловолокна застосовуються для виробництва вогнетривких тканин, тросів і утеплювачів житлових приміщень.

Професор матеріалознавства Прабхат Гупта з колегами знайшов метод підвищення міцності E - glass та

інших видів скла, що використовуються в оптоволоконних лініях зв'язку. Метод легко впровадити у виробництво - весь принцип нової технології зводиться до охолодження скляних волокон і деформування їх аж до зламвання. Головне - попередньо пересвідчитися, що в склі немає дефектів.

Для вимірювань Гупта використовував волокна товщиною в 100 мікрон, охолоджені до температури -195°C . Потім зразки згинали в U - подібну форму і здавлювали між двома металевими пластинами. Заморожені волокна витримували тиск до півтора мільйона фунтів на см^2 . Ця цифра майже в 1,7 рази більше, ніж показували ранні експерименти - 870000 фунтів на см^2 .

Немає нічого дивного в тому, що відкрита властивість не була до сих пір виявлена. Матеріали удосконалюються для виконання певних завдань.

Іншим важливим відкриттям є створення фотонного мікročіпа малих розмірів. Кожні 80-100 км сигнал потребує очищення і посилення. Дотепер для цих цілей використовувалися громіздкі електронні підсилювачі, які гальмували сигнал.

Але досить недавно вчені продемонстрували науковому світу світловий підсилювач на кремнієвому чіпі, дія якого заснована на чотири-хвильовій взаємодії, яка підсилює оптичний сигнал «підкачкою» від іншого світлового джерела. Дана схема може використовуватися для очищення сигналу і формування чітких імпульсів. При цьому направляючий промінь складається із серії імпульсів, синхронізованих з вхідним сигналом.

Розміри такого пристрою дуже малі. Кремнієвим хвилевод складає декілька сотень нанометрів в поперечнику і 1,8 см завдовжки, він змонтований на кремнієвому чіпі розміром 1 нм. Довжина хвилеводу менше, ніж довжина хвилі випромінювання, тому

початковий сигнал і сигнал «підкачки» обмінюються енергією на дуже короткій відстані. Крім того існує можливість не тільки посилення сигналу, але і зміни його довжини хвилі.

Пульсуючий сигнал «підкачки» об'єднаний із світловим променем іншої частоти підсилює сигнал, але не очищує його. Використання фотонного мікрочіпа дозволяє усунути цей недолік, і на виході системи ми маємо посилений сигнал з чіткими імпульсами. Ця система працює в широкому діапазоні довжин хвиль, вона може бути використана для складних оптоволоконних систем, в яких декілька довжин хвиль безперервно використовуються для передачі сигналів.