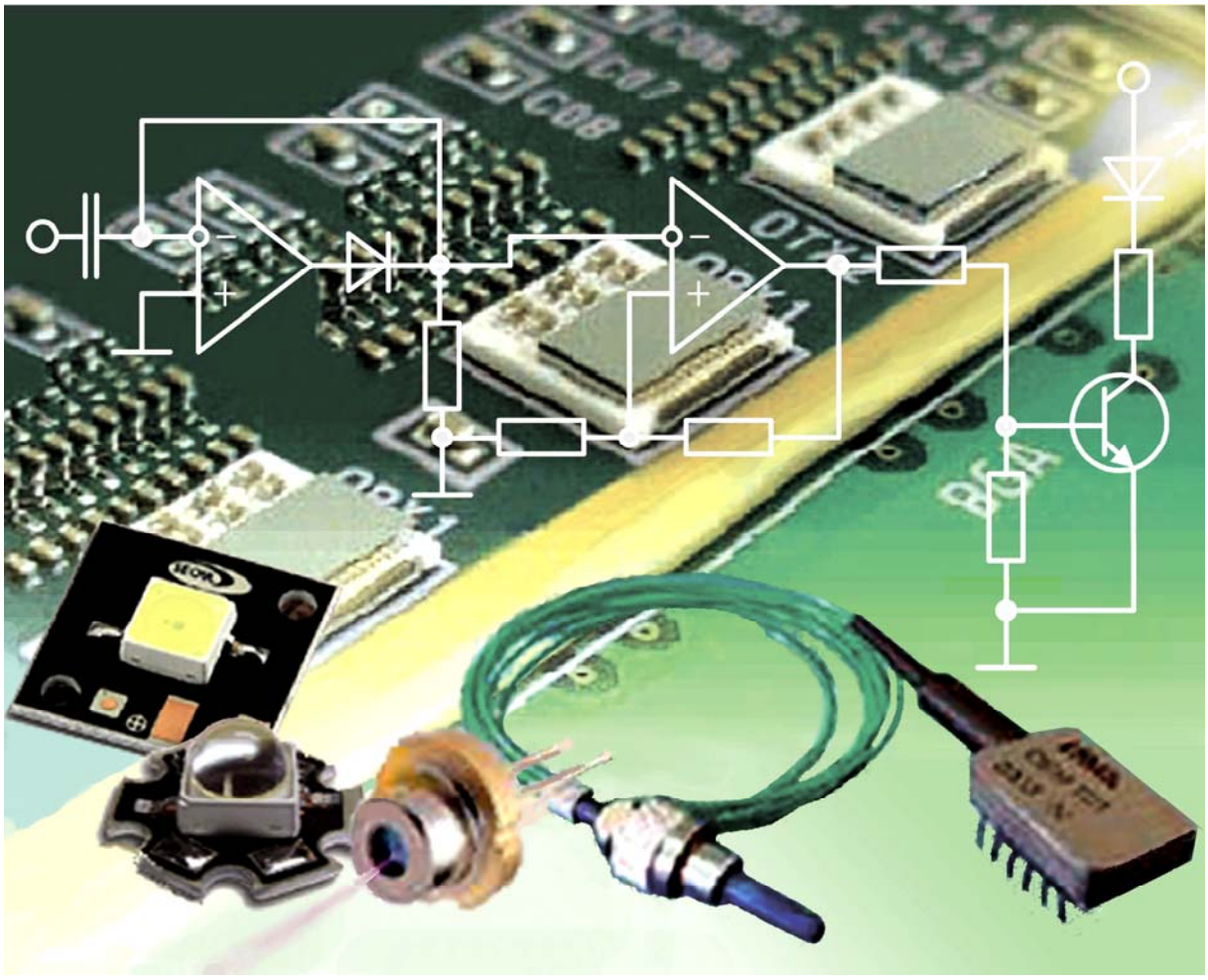
В. П. Кожем'яко, С. В. Павлов,
М. Г. Тарновський

# ОПТОЕЛЕКТРОННА СХЕМОТЕХНІКА



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**В. П. Кожем'яко, С. В. Павлов, М. Г. Тарновський**

# ОПТОЕЛЕКТРОННА СХЕМОТЕХНІКА

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом „Оптотехніка"

УНІВЕРСУМ- Вінниця 2008

**УДК 621.382, 621.383**
**К 58**

*Рецензенти*:

***С. В. Свечніков,*** доктор технічних наук, професор
***В. І. Осінський,*** доктор технічних наук, професор
***Л. І. Тимченко,*** доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до видання Міністерством освіти і науки України.
Лист № 1.4/18-Г-701 від 28.03.08 р.

**Кожем'яко В. П., Павлов С. В., Тарновський М. Г.**
К 58 **Оптоелектронна схемотехніка.** Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. - 189 с.

**ISBN**

У навчальному посібнику подані матеріали щодо класифікації та принципів роботи основних оптоелектронних приладів, розглянуті схемотехнічна реалізація та сфери застосування оптоелектронних пристроїв, викладені основи їх побудови та функціонування, розглянуті перспективи подальшого розвитку оптоелектронних технологій.

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальностей “Оптотехніка”, “Електронні прилади та пристрої” та інших напрямів, які передбачають розробку оптоелектронних приладів та систем.

УДК 621.382, 621.383

**ISBN**

© В.П. Кожем'яко, С.В. Павлов, М.Г. Тарновський, 2008

# ЗМІСТ

Передмова .....5
Вступ .....7

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ СХЕМОТЕХНІКИ.....9

1.1 Оптоелектроніка як перспективний науково-технічний напрям побудови інформаційно-обчислювальних систем.....9
1.2 Основні поняття оптоелектроніки. Класифікація елементної бази оптоелектронної схемотехніки .....13
1.3 Аналіз ефективності використання методів та засобів оптоелектроніки та критерії їх оцінювання .....16
Контрольні питання .....18

2 ЕЛЕМЕНТНА БАЗА ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ.....19

2.1 Джерела випромінювання та їх основні характеристики .....19
2.1.1 Оптичне випромінювання твердих тіл .....19
2.1.2 Світлодіоди та нові покоління надяскравих джерел.....26
2.1.3 Напівпровідникові інжекційні лазери.....33
2.2 Фотоприймачі.....37
2.2.1 Фотоелектричні явища у твердомі тілі .....38
2.2.2 Основні параметри та характеристики фотоприймачів.....40
2.2.3 Фоторезистори.....42
2.2.4 Фотодіоди .....42
2.2.5 Фототранзистори.....54
2.2.6 Фототиристори .....55
2.2.7 Багатоелементні фотоприймачі .....58
2.3 Оптрони.....62
Контрольні питання .....65

3 ОПТОЕЛЕКТРОННІ СХЕМИ ІЗ СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЧАМИ.....68

3.1 Схеми ввімкнення світлодіодів .....68
3.2 Схеми оптичної передачі даних .....72
Контрольні питання .....82

4 ОПТОЕЛЕКТРОННІ СХЕМИ З ФОТОПРИЙМАЧАМИ .....84

4.1 Схеми на основі фоторезисторів .....84
4.2 Схеми на основі фотодіодів .....88
4.3 Схеми на основі фототранзисторів .....95
Контрольні питання .....104

5 ОПТОЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ .....106

5.1 Оптолектронні логічні елементи .....106
5.2 Багатофункціональні оптоелектронні елементи .....107
5.3 Схемотехніка оптоелекронних функціональних перетворювачів .....119
5.3.1 Кодування інформації в оптоелектронних функціональних перетворювачах .....119
5.3.2 Синтез багатофункціональних модулів на квантронах і приклади їх реалізації .....130
5.3.3 Динамічні оптичні оперативні запам’ятовувальні пристрої на ВОЛЗ .....152
Контрольні питання .....164

6 КВАНТОВА ОПТОЕЛЕКТРОНІКА .....165

6.1 Техніко-економічні основи наноелектроніки .....165
6.2 Квантові комп’ютери .....167
6.3 Гетеролазерні та квантоворозмірні технології .....170
6.4 Функціональний оптрон .....173
6.5 Надшвидкісні квантові нанопроцесори .....176
Контрольні питання .....185

ЛІТЕРАТУРА .....186

# ПЕРЕДМОВА

Наприкінці XX сторіччя стало ясно, що сучасні вимоги в області інформатики і зв'язку неможливо задовольнити за допомогою традиційних засобів електроніки, навіть при наявності великих і надвеликих інтегральних схем. Основними шляхами подолання існуючих проблем є пошук та застосування нових принципів подання, обробки і передачі інформації. Оптоелектроніка є тим науково-технічним напрямом, який надає можливості принципового перетворення існуючих обчислювальних систем. Сучасні оптоелектронні прилади і технології відрізняються економічністю, надійністю, технологічністю, швидкодією, довговічністю і мініатюрністю. Ці характеристики, відповідаючи запитам сучасного "інформаційного" суспільства, дозволяють оптоелектроніці зайняти міцне положення одного з найперспективніших напрямів науки та техніки. У цьому сенсі набуває сили думка багатьох вчених та аналітиків, що на зміну XX сторіччю – сторіччю мікроелектроніки, прийшло XXI сторіччя, яке стане сторіччям оптоелектроніки та комп’ютерних технологій.

Не викликає ніяких сумнівів те, що подальший розвиток практично усіх галузей сучасної промисловості, буде забезпечуватися переходом до широкого і всебічного застосування нанотехнологій – технологій маніпуляції окремими атомами та молекулами, у результаті яких створюються принципово нові структури. Перехід від кремнієвої мікроелектроніки до наноелектроніки примушує звертатися до нових матеріалів, таких як арсенід галію, арсенід індію, фосфід індію та інших, які сьогодні широко використовуються в оптоелектроніці. Це дозволяє прогнозувати, що майбутні пристрої та системи передачі, обробки, зберігання та відображення інформації будуть реалізовуватися за допомогою саме оптичних та оптико-електронних нанотехнологій.

У зв’язку з цим стає очевидним, що підготовка кваліфікованих спеціалістів в області оптичної інформатики, яка займається проблемами створення нового покоління швидкодіючих оптичних комп’ютерів та оптичних систем штучного інтелекту, повинна здійснюватися поєднанням фундаментальної підготовки з оптики та підготовки з базових дисциплін, пов’язаних з інформаційними технологіями та телекомунікаціями. Оптоелектронна схемотехніка, яка охоплює питання використання

оптоелектронної елементної бази для побудови пристроїв різноманітного функціонального призначення, є тією ланкою, яка пов'язує оптику з іншими технічними напрямами.

Даний навчальний посібник є спробою об'єднання матеріалу за основи схемотехнічного застосування основних елементів оптоелектроніки, таких як світлодіоди, фотодіоди, фототранзистори та оптрони, та показує як ці оптоелектронні елементи дозволяють створювати пристрої з широкими функціональними можливостями. Науково-технічний напрям, основам якого присвячена значна частина викладеного у посібнику матеріалу, сьогодні не лише представляє цілу наукову школу, а й отримав широке міжнародне визнання.

Автори сподіваються, що даний навчальний посібник буде цікавим і корисним як студентам, так і спеціалістам, які займаються проектуванням нових засобів автоматики, зв'язку, інформаційно-вимірювальних та обчислювальних структур з використанням оптоелектронної елементної бази.

Автори виражають подяку колективу кафедри „Оптичних та оптико-електронних приладів" Національного технічного університету України "Київська політехніка" за критичні зауваження та корисні поради щодо вдосконалення навчального посібника.

Автори вдячні аспірантам кафедри „Лазерної та оптоелектронної техніки" Вінницького національного технічного університету Клімкіній Д. І. та Маліновському В. І. за допомогу в підготовці та оформленні посібника.

# ВСТУП

Оптоелектроніка – науково-технічний напрям, пов’язаний з вивченням ефектів взаємодії між електромагнітними хвилями оптичного діапазону та електронами твердого тіла та створенням оптоелектронних приладів, в яких ці ефекти використовуються для формування, передачі, обробки, зберігання та відображення інформації.

Спочатку оптоелектроніка розглядалася лише як область електроніки, в яку включалися тільки фотоприймачі та світловипромінювачі. Проте успіхи, які досягнуті останнім часом у цій сфері, суттєво змінили розуміння та поняття оптоелектроніки. З’явилися терміни „функціональна оптоелектроніка”, „багатофункціональні оптоелектронні модулі” і т.п. Таким чином, у наш час оптоелектроніка стала багатогранним науковим напрямом, області застосування якої в техніці, біології, медицині важко перерахувати.

Сучасну оптоелектроніку як науково-технічний напрям характеризують такі основні риси:

1. Фізичну основу оптоелектроніки складають явища, методи та засоби, для яких принциповим є поєднання та нерозривність оптичних та електричних процесів. В математичних моделях оптоелектронних приладів використовуються функції, аргументами яких виступають оптичні та електричні величини.

2. Технічну основу оптоелектроніки визначають: мініатюризація елементів; інтеграція елементів та функцій; орієнтація на спеціальні надчисті матеріали; використання методів групової обробки, таких як епітаксія, фотолітографія, дифузія, іонна імплантація, нанесення тонких плівок та ін.

3. Функціональне призначення оптоелектроніки полягає у вирішенні задач інформатики: формування інформації шляхом перетворення різних зовнішніх впливів у відповідні оптичні та електричні сигнали; передача та перетворення інформації; зберігання інформації, яке включає такі процеси як запис, безпосереднє зберігання, зчитування, стирання; відображення інформації, яке полягає у перетворенні вихідних сигналів інформаційної системи до вигляду, придатного для сприйняття людським оком.

Для вирішення зазначених задач в оптоелектронних пристроях використовуються як оптичні, так і електричні сигнали. При цьому

визначальними є саме оптичні, чим і досягається те якісне нове, що і відрізняє оптоелектроніку від електроніки.

Строго здійснити розмежування у всіх без винятку конкретних випадках не завжди вдається, але в цілому зазначені вище особливості дозволяють окреслити коло тих пристроїв, схемна реалізація яких розглядається у даному навчальному посібнику.

Оптоелектроніка синтезує у собі досягнення багатьох областей науки та техніки, серед яких у першу чергу повинні бути виділені квантова електроніка, напівпровідникова техніка, оптика, електрооптика, нелінійна оптика, фотоелектроніка, голографія, волоконна оптика та інфрачервона техніка.

Новий поштовх для розвитку оптоелектроніки дає розвиток наноелекроніки, яка зародилася в глибинах мікроелектронної технології при створенні надвеликих інтегральних схем та гетеролазерів, що характеризуються різким зменшенням елементів активних та пасивних областей до нанометрів. Оскільки ці величини є порівнянними з розмірами атомів та довжинами хвиль електронів та фотонів, відбувається перехід на нові методи формування напівпровідникових, діелектричних та металевих структур, відхід від традиційних технологій та пошук нових, більш досконалих технологічних процесів на атомно-молекулярному рівні. Серед різноманітності розробок наноелектронних технологій найбільше практичне застосування отримала реалізація наноструктур за допомогою іонних та молекулярних потоків: іонна імплантація та літографія, плазмене нанесення та травлення плівок, молекулярно-променева епітаксія гетероструктур.

Використання іонних процесів при інтеграції наноструктур в функціональних мікро- та оптоелектронних приладах відкриває нові перспективи побудови надшвидкісних нанопроцесорів на основі іонних нанотехнологій створення кванторозмірних гетерогенних інформаційних середовищ в земних та космічних умовах. Після того, як такі технології увійдуть у практику, вони можуть революціонізувати усі існуючі методи конструювання та виготовлення мікроелектронних та оптоелектронних пристроїв, забезпечуючи їх високу надійність, малі енергетичні втрати у поєднанні з простотою та низькою вартістю виготовлення.

# 1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ СХЕМОТЕХНІКИ

## 1.1 Оптоелектроніка як перспективний науково-технічний напрям побудови інформаційно-обчислювальних систем

Рівень технічного прогресу значною мірою визначається темпами розвитку кібернетики, зокрема засобами автоматики, інформаційно–вимірювальної й обчислювальної техніки. Характер науки або виробництва у більшості випадків вимагає дослідження процесів, що протікають у реальному масштабі часу, отримання інформації із сотень і більше точок. Інформація, одержувана від автоматизованих установок, підлягає вимірюванні та швидкій обробці. Вирішальну роль у таких випадках виконують засоби обчислювальної техніки, що можуть у реальному часі керувати різними процесами.

На рубежі XX – XXI століть електронні інформаційні технології досягли фундаментальних і технічних меж продуктивності при триваючому росту споживчого попиту на швидкість і обсяг інформації, що оброблюється та передається. Ключовим рішенням даної проблеми є розробка нового покоління інформаційно-телекомунікаційних систем, основаних на оптоелектронних технологіях. З'явився новий напрям, що найбільш динамічно розвивається та визначає прогрес світової науки і техніки, - оптоінформатика. Вона охоплює область науки і техніки, пов'язану з дослідженням, розробкою, створенням і експлуатацією нових матеріалів, технологій, приладів і пристроїв, спрямованих на передачу, прийом, обробку, збереження і відображення інформації на основі оптичних технологій. Таким чином, оптоінформатика – це складова і, у той же час, домінуюча та невід’ємна частина оптоелектроніки, головний вектор розвитку якої орієнтований на інтеграцію оптичних, інформаційних і телекомунікаційних технологій.

Об'єктами оптоелектроніки взагалі й оптоінформатики зокрема є елементна база, системи, методи, матеріали і технології, що забезпечують оптичну передачу, прийом, обробку і збереження інформації на основі оптичних технологій.

За останні роки відбувся якісний революційний стрибок у світовій оптоелектроніці. Створені принципово нові покоління лазерів, світлодіодів, приймачів випромінювання, оптичних матеріалів, оптичних елементів, пристроїв і систем. Створено нові напрямки в оптиці – інтегральна, волоконна, градієнтная і нелінійна оптика, мікро- і нанооптика, хвильовідна оптоелектроніка і т.д.

Традиційний напрямок застосування елементів оптоелектроніки у різних областях науки та техніки – візуалізація та відображення інформації. Будь-яких істотних альтернатив оптоелектронним елементам у цій сфері застосування поки не знайдено. Тут вони знаходяться поза конкуренцією і головне завдання полягає в удосконаленні технічних засобів відображення інформації на основі використання як нових індикаторних елементів, так і нових схемотехнічних рішень.

Проте принципові переваги елементів оптоелектроніки, які базуються на використанні як носіїв інформації електрично нейтральних фотонів, дозволяють суттєво розширити області застосування оптоелектронних елементів. Застосування методів та засобів оптоелектроніки в інформаційно–вимірювальних, обчислювальних та телекомунікаційних системах відкривають у порівнянні з традиційними електронними засобами нові більші можливості в передачі та обробці інформації завдяки таким перевагам:

1) забезпеченню ідеальної електричної (гальванічної) розв'язки між входами і виходами;

2) реалізації безконтактного оптичного управління об'єктами та обумовлена цим різноманітність та гнучкість конструкторських рішень в побудові кіл керування;

3) несприйнятливості до впливу електромагнітних полів, яка обумовлює високу захищеність від завад та виключає взаємні наведення у колах зв’язку;

4) широкій частотній смузі пропускання оптичних каналів, односпрямованість та незмішуваність інформаційних потоків обумовлює високу швидкість та продуктивність в обміні інформації;

5) незалежності в розповсюдженні світлових промінів, що відкриває нові можливості паралельного введення та паралельної обробки інформації.

Задачі швидкої (паралельної) обробки інформації, що вимагають високої швидкості виконання, виникають при обробці аерокосмічних, геофізичних, радіолокаційних даних, при керуванні швидкими динамічними об'єктами (процесами, явищами), при обробці зорових, слухових, тактильних і інших образів. Машини з послідовно виконуваними командами, що будуються на традиційній елементній базі і мають традиційні структури, відрізняються недостатньою продуктивністю для рішення перерахованих задач.

Продуктивність сучасних засобів обробки інформації досягається розпаралелюванням процесу обчислень. Створюються багатомашинні і багатопроцесорні обчислювальні системи. Продуктивність таких систем досягає сотень і більше мільйонів операцій у секунду. Однак при побудові обчислювальних систем виникають складні проблеми ефективної взаємодії складових частин ЕОМ.

У рамках традиційних рішень схемо- і системотехніки можна здійснювати також розпаралелювання інформації шляхом використання морфологічного структурного принципу ЕОМ, основу якого складають асоціативні процесори.

Один з перспективних напрямків у створенні обчислювальних машин майбутнього пов'язаний з розробкою спеціалізованих обчислювальних пристроїв обробки зображень. При проектуванні таких пристроїв значних успіхів дозволяє досягти оптоелектронна технологія, яка дає можливість використовувати нові принципи передачі, перетворення, обробки і збереження інформації в реальному часі.

Одним з найважливіших підходів до створення високопродуктивних комплексів з паралельною обробкою інформації є використання чисто оптичних ефектів. Оптичні обчислювальні системи будуються на основі давно відомих законів оптики, однак новий погляд на сутність цих законів привів до нових важливих результатів: появи голографії, розробки лазерів, голографічних просторово-частотних фільтрів і безлічі просторово-часових

модуляторів оптичного сигналу. Усі ці засоби відносяться до засобів оптичної обробки інформації.

Інший напрямок використання досягнень сучасної оптики – обробка оптичної інформації аналоговими засобами, що дозволяють реалізувати перетворення Френеля і Фур'є за допомогою оптичних елементів.

Суттєвим недоліком таких оптичних систем є те, що до технології і юстування оптичних схем висуваються досить жорсткі вимоги, що значно звужує область їх застосування і не дає радикальної переваги в продуктивності ЕОМ.

Новий напрямок в оптичній обчислювальній техніці – паралельна обробка інформації оптоелектронними гібридними обчислювальними засобами, що об’єднують обчислювальні ресурси ЕОМ і можливості оптичних процесорів (а також можливості запам'ятовувальних пристроїв). Оптоелектронні гібридні обчислювальні системи будуються на основі обчислювальних засобів загального призначення з розвитими каналами введення/виведення і базовим програмним забезпеченням, орієнтованим в основному на обробку зображень, що значно звужує область практичного застосування.

Відомі спроби використовувати принципи паралельної обробки інформації в оптичних дискретних засобах (на базі когерентної оптики). Однак практичне застосування подібних засобів ускладнене, оскільки необхідна для цього елементна база знаходиться в стадії свого розвитку.

Останнім часом велике поширення отримали безлінзові оптоелектронні процесори з паралельною обробкою інформації. Такі процесори на базі матричних оптоелектронних пристроїв, які виконані у вигляді мікроскладань або мікромодулів, одержали назву електрооптичних мікропроцесорів.

Однак для реалізації таких матричних електрооптичних мікропроцесорів, наприклад з оптичним покадровим введенням/виведенням, потрібна подальша розробка більш складного комплексу пристроїв, зокрема вузла паралельного оптичного введення зовнішньої інформації, і побудова оптоелектронних структур з більш вдосконаленими принципами обробки інформації без застосування

трудомістких у виконанні і нетехнологічних транспарантів, на функціонування яких накладаються жорсткі обмеження. Таким чином, при реалізації методів і засобів оптичної обчислювальної техніки мають місце такі серйозні недоліки принципового характеру, що значно звужують область їхнього застосування:

1) жорсткі вимоги до технології і юстування оптичних установ, великі габаритні розміри таких установ;

2) існуючі оптичні керовані транспаранти в ряді випадків не мають необхідних характеристик (швидкодії, роздільної здатності, технологічності).

Центральне місце в класифікації приділяється логіко-часовій обробці інформації оптоелектронними засобами. За одиницю інформації при логіко-часовій обробці вибирається час спрацювання одного елементарного операційного елемента (квантрона). У результаті один біт інформації може трактуватися як внутрішня властивість зміни стану елемента, а сама інформація подається тривалістю світлового імпульсу.

## 1.2 Основні поняття оптоелектроніки. Класифікація елементної бази оптоелектронної схемотехніки

Оптоелектроніка – розділ науки і техніки, який вивчає як оптичні, так і електронні явища в речовинах, їх взаємозв'язки і перетворення, а також прилади (елементи), схеми і системи, створені на основі цих явищ.

Оптоелектронний елемент – прилад, що використовує для своєї роботи електромагнітне випромінювання оптичного (видимого або невидимого) діапазону. Елементна база оптоелектронної схемотехніки містить у собі такі прилади:

- *світловипромінювачі* – прилади, які перетворюють електричну енергію в енергію оптичного випромінювання заданого спектрального складу і просторового розподілення; світловипромінювачі є основою практично будь-якої оптоелектронної системи; за характером випромінюваних світлових потоків світловипромінювачі бувають когерентні і некогерентні (відповідно до цього розділяють когерентну і

некогерентну оптоелектроніку). Когерентними світловипромінювачами є оптичні квантові генератори (лазери), а некогерентними – світлодіоди;

- *фотоприймачі* – прилади, в яких під дією оптичного випромінювання відбуваються зміни, що дозволяють зафіксувати це випромінювання та виміряти його характеристики; фотоприймачі є обов'язковими та важливими елементами багатьох оптоелектронних систем; за принципом дії усі фотоприймачі поділяються на теплові та фотоелектричні; принцип дії теплових оснований на використанні фізичних явищ (наприклад, зміна опору або генерація заряду), які спостерігаються у чутливому елементі при зміні його температури під впливом поглинутого випромінювання; робота фотоелектричних фотоприймачів основана на використанні зовнішнього або внутрішнього фотоефекту;

- *модулятори* – прилади, які вводять інформацію у світлову хвилю за рахунок зміни у часі однієї з її характеристик – амплітуди, частоти, фази або поляризації;

- *дефлектори* – прилади, які дозволяють відхиляти світлові промені;

- *оптрони* – прилади, які містять світловипромінювач та фотоприймач, що конструктивно та оптично пов'язані між собою;

- *індикатори* – прилади, які відображають інформаційні параметри сигналів у формі, яка може бути сприйнята та оцінена людським оком;

- *оптична інтегральна схема* – мініатюрний твердотільний прилад, що складається з плоских тонкоплівкових хвильоводів (аналоги металевих дротів), які забезпечують зв'язок між плівковими активними оптоелектронними елементами (світловипромінювачами, фотоприймачами та ін.), забезпечуючи виконання заданих функцій;

- *оптоелектронні датчики (сенсори)* – прилади з оптронною структурою, що містять світловипромінювач, фотоприймач та оптичне середовище між ними, яке є чутливим елементом, властивості якого змінюються під впливом зовнішніх факторів;

- *світловоди* – прилади, що утворюють канали зв'язку і являють собою тонкі нитки, виготовлені з прозорого матеріалу, розповсюдження світлових промінів по яких основане на явищі повного внутрішнього відбиття.

*Оптоелектронна система* – сукупність оптоелектронних пристроїв, об'єднаних міжелементними зв'язками в одне ціле для реалізації певних функцій.

*Інформаційна оптоелектронна мережа* – сукупність оптоелектронних систем, об'єднаних просторово–оптичними або волоконно–оптичними лініями зв'язку. Лінії зв'язку можуть бути організовані на когерентних (за допомогою лазерів) або некогерентних (видимих або невидимих спектрах оптичного випромінювання) джерелах світла. Кожна система інформаційної оптоелектронної мережі може містити безліч зосереджених (локальних) підсистем.

*Функція оптоелектронної системи* – правило (або сукупність правил) реалізації результатів, обумовлених призначенням системи. Таким чином, функція системи – це сукупність виконуваних оптоелектронних процесів, що мають місце в оптоелектронній системі. Функції, як правило, визначаються розроблювачами перед проектуванням оптоелектронної системи і можуть бути різними: збереження, перетворення, обробки, передачі, прийому і т.п.

*Структура оптоелектронної системи* – фіксована або така, що перебудовується, сукупність елементів і зв'язків між ними. Структура оптоелектронної системи визначає, з яких елементів, вузлів або пристроїв вона складається. Цією ж структурою визначається спосіб зв'язку оптоелектронних елементів, вузлів або пристроїв один з одним з метою створення загальної архітектури системи. Інженерна форма відображення структури – оптоелектронна схема.

*Оптоелектронні логічні елементи* – елементи, що визначають принципи встановлення зв'язків між вхідними і вихідними сигналами оптоелектронних пристроїв і відносяться до класу елементарних оптоелектронних схем. Вони є свого роду оптоелектронними перетворювачами вхідних оптичних (або електричних) сигналів. Основне призначення оптоелектронних логічних елементів – реалізація логічних (простих або складних) операцій над оптичними або електричними (або комплексними) сигналами.

*Запам'ятовувальні оптоелектронні елементи* – елементи, основним призначенням яких є запам'ятовування оптичних або електричних сигналів, що надходять на вхід. Характерна риса цих елементів (на відміну від електронних) у тому, що процеси запам'ятовування супроводжуються ефектами візуальної індикації.

*Допоміжні оптоелектронні елементи* – елементи, що сприяють установленню з'єднувальних режимів оптоелектронних логічних елементів або елементів пам'яті інформації. До таких елементів відносяться підсилювачі, перетворювачі (подільники, помножувачі, суматори і т.п.), елементи затримки, генератори, синхронізатори і т.д., що в загальному побудовані на базі оптоелектронної схемотехніки.

## 1.3 Аналіз ефективності використання методів та засобів оптоелектроніки та критерії їх оцінювання

Відомо, що параметри сучасних інтегральних мікросхем (ІМС) взаємно пов'язані і визначають як рівень інтеграції, так і широту можливих їх застосувань. Це твердження повною мірою відноситься і до оптоелектронних елементів і функціональних схем. Так, наприклад, збільшення навантажувальної здатності для оптоелектронних елементів (збільшення коефіцієнта оптичного або електричного розгалуження по виходу) знижує швидкодію схем і збільшує споживану потужність, а підвищення швидкодії збільшує потужність, що розсіюється, і, у свою чергу, знижує рівень інтеграції. Тому для комплексної оцінки схемотехнічного базису ІМС доцільно поряд з параметром "потужність · швидкодія", що для заданої технології виготовлення ІМС залишається постійним, використовувати такий параметр як "час затримки · рівень інтеграції". Звичайно рівень інтеграції характеризується коефіцієнтом $K$, що дорівнює десятковому логарифму від числа елементів ($K = \log_{10}N = \lg N$).

Більш об'єктивну оцінку рівня інтеграції дає врахування числа вентилів на кристалі.

Для комплексної оцінки схемотехнічного базису необхідно

порівнювати такі три якості:

– фактор якості $F_K = P_{сер} \cdot t_з$, де $P_{сер}$ – середня споживана потужність, $t_з$ – середній час затримки;

– швидкодію (кількість перемикань в одиницю часу);

– щільність елементів $S_N$;

– функціональну щільність компонування $S'$;

– тип застосовуваної технології.

Для всебічної оцінки базових ІМС є прийнятним поняття добротності $Q$, що враховує логічну гнучкість базових схем $L$, відносну завадостійкість $\delta U$, фактор якості $F_K$ і щільність компонування $S_N$, тобто

$$Q = \frac{L \cdot \delta U}{F_K \cdot t_3 \cdot S_N} . \qquad (1.1)$$

Проте для оцінки вимог і кола розв'язуваних задач оптоелектронними елементами і пристроями більш об'єктивним стає модифікований критерій добротності $Q_M$, що дає можливість оцінювати перспективність використання елементної бази. Крім показників $\delta U$, $F_K$ і $S_N$, він повинен враховувати максимальну теоретичну граничну частоту перемикання оптоелектронних елементів $f_{\max}$, функціональну повноту елементів $K_Ф$, час їхньої енергетичної відновлюваності $t_E$, тобто час відновлення інформаційного потоку, коефіцієнт корисної дії (ККД) енергетичного перетворення $K_E$, ефективність елементів і пристроїв $K_{EФ}$ і показник рівня інтеграції $F_I$. Таким чином, модифікований критерій добротності має вигляд:

$$Q_M = Q \cdot F_I \cdot f_{\max} \cdot K_Ф \cdot \frac{1}{t_E} \cdot K_Ф \cdot K_{EФ} . \qquad (1.2)$$

З виразу (1.2) витікає, що модифікований критерій добротності $Q_M$ тим більший, чим вища гранична частота перемикання елементів.

За основними параметрами (швидкодією, споживаною потужністю, контролепридатністю) ефективність елементної бази можна ще оцінювати

за допомогою усередненого узагальненого критерію, який виражає усереднену суму ефективностей за даними параметрами ідеального і реального оптоелектронного пристрою, тобто |

$$E = \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{П_{IT}}{П_{PT}} + \frac{П_{IP}}{П_{PP}} + \frac{П_{IK}}{П_{PK}} \right), \qquad (1.3)$$

де $П_{IT}$, $П_{IP}$, $П_{IK}$ – параметри ідеального пристрою за швидкодією, споживаною потужністю і контролепридатністю;

$П_{PT}$, $П_{PP}$, $П_{PK}$ – ті ж самі параметри для реального пристрою.

Діапазон зміни критерію (1.3) для практичних (реальних) пристроїв лежить у межах $0 < E < 1$.

**Контрольні питання**

1. Охарактеризуйте переваги оптоелектронних методів та засобів.
2. Дайте пояснення таким поняттям як оптоелектроніка, оптоелектронний елемент, оптоелектронна система.
3. Дайте пояснення таким поняттям: інформаційна оптоелектронна мережа, функція оптоелектронної системи, структура оптоелектронної системи.
4. Охарактеризуйте функціональне призначення таких елементів оптоелектроніки: світловипромінювач, фотоприймач, модулятор, дефлектор, індикатор, оптрон, запам’ятовувальний оптоелектронний елемент.
5. Які критерії можуть бути застосовані при оцінюванні ефективності оптоелектроних пристроїв?

# 2 ЕЛЕМЕНТНА БАЗА ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ

## 2.1 Джерела випромінювання та їх основні характеристики

### 2.1.1 Оптичне випромінювання твердих тіл

Оптичне випромінювання – це електромагнітне випромінювання з довжиною хвиль від 1 м до 1 нм. Історично склалося, що характеристики оптичного випромінювання оцінюють енергетичними та світловими (фотометричними) параметрами. *Енергетичні* параметри характеризують випромінювання безвідносно до його дії на будь-який приймач випромінювання і пов'язані з енергією, що переноситься випромінюванням. За допомогою *світлових* параметрів оцінюють випромінювання, якщо в ролі приймача виступає людське око. У таблиці 2.1 наведені основні енергетичні та відповідні до них світлові характеристики оптичного випромінювання.

Таблиця 2.1 - Основні енергетичні та світлові величини

| Енергетична величина | Позначення та вираз за означенням | Одиниця | Світлова величина | Позначення та вираз за означенням | Одиниця |
|---|---|---|---|---|---|
| Потік випромінювання | $\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_{e\lambda}(\lambda)d\lambda$ | Вт | Світловий потік | $F = \Phi_v = 680\int_{0.38}^{0.76} V(\lambda)\Phi_{e\lambda}(\lambda)d\lambda$ | лм |
| Енергія Випромінювання | $Q_e = \int_0^t \Phi_e(t)dt$ | Дж | Світлова енергія | $Q_v = \int_0^t \Phi_v(t)dt$ | лм·с |
| Сила випромінювання | $I_e = d\Phi_e / d\Omega$ | Вт·ср$^{-1}$ | Сила світла | $I_v = d\Phi_v / d\Omega$ | кд або лм·ср$^{-1}$ |
| Енергетична яскравість, променистість | $L_e = I_e /(dA_1 \cos\varepsilon)$ | Вт·ср$^{-1}$·м$^{-2}$ | Яскравість | $L_v = I_v /(dA_1 \cos\varepsilon)$ | кд·м$^{-2}$ |
| Енергетична світимість, Випромінювальність | $M_e = d\Phi_e / dA_1$ | Вт·м$^{-2}$ | Світимість | $M_v = d\Phi_v / dA_1$ | лм·м$^{-2}$ |
| Енергетична освітленість | $E_e = d\Phi_e / dA_2$ | Вт·м$^{-2}$ | Освітленість | $E_v = d\Phi_v / dA_2$ | лк |
| Енергетична експозиція | $H_e = \int_0^t E_e(t)dt$ | Вт·м$^{-2}$ с | Світлова експозиція | $H_v = \int_0^t H_v(t)dt$ | лк·с |
| $dA_1$- площа ділянки поверхні, що випромінює; $dA_2$ - площа ділянки поверхні, що освітлюється; $d\Omega$ – тілесний кут, в якому розповсюджується випромінювання; ε – кут між нормаллю до поверхні та напрямом розповсюдження світла | | | | | |

Як видно з таблиці енергетичні та світлові параметри випромінювання за суттю є однаковими, проте мають різні одиниці виміру. Крім інтегральних $\Phi_e$, $\Phi_v$,..., тобто розглядуваних в широкому спектральному діапазоні, енергетичних та світлових величин, в практиці використовуються їх спектральні щільності $\Phi_e(\lambda)$, $\Phi_v(\lambda)$, ... Наприклад, $\Phi_e(\lambda)=\Delta\Phi_e/\Delta\lambda = d\Phi_e / d\lambda$ і т.п. Часто, коли ясно, про які величини йде мова, індекси *e* (енергетичний) та *v* (візуальний) опускають.

Перехід від об'єктивної, що не залежить від властивостей приймача випромінювання, системи енергетичних величин до суб'єктивної – світлової системи – проводиться на основі співвідношення між світловим потоком $\Phi_v$ та потоком випромінювання $\Phi_e$:

$$F = \Phi_v = K_m \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} V(\lambda)\Phi_{e\lambda}(\lambda)d\lambda, \qquad (2.1)$$

де $K_m \approx 680$ лм·Вт$^{-1}$ – максимальне значення спектральної ефективності монохроматичного випромінювання для ока людини (на довжині хвилі $\lambda \approx 0{,}555$ мкм);

$\lambda_1 \ldots \lambda_2$ – діапазон спектральної чутливості ока (зазвичай $\lambda_1 = 0{,}38$ мкм, $\lambda_2=0{,}76$ мкм);

$V(\lambda)$ – спектральна характеристика чутливості ока.

Оптичне випромінювання може бути когерентним і некогерентним. *Некогерентне* випромінювання виникає, коли електрони в атомі, що знаходяться на високому енергетичному рівні, мимовільно, без зовнішнього втручання переходять на більш низький енергетичний рівень, випромінюючи при цьому квант світла. У результаті, кожен атом генерує випромінювання спонтанно і незалежно від інших. Внаслідок цього, напрями поляризації і фази хвиль, що випромінюються, є різними. Оскільки промінь світла є суперпозицією електромагнітних хвиль, які випромінюються окремими атомами, то напрям поляризації та фаза результуючого світлового потоку в окремих точках простору будуть змінюватися хаотично. Для отримання *когерентного* випромінювання, що характеризується передбачуваністю та визначеністю цих параметрів,

переходи електронів в атомах з вищого енергетичного рівня на нижчий повинні бути узгодженими. Цього можна досягти при використанні зовнішнього випромінювання з енергією фотонів близькою до різниці енергій енергетичних рівнів, між якими здійснюється перехід. Генероване у результаті таких переходів випромінювання, яке називають вимушеним або індукованим, буде мати таку саму довжину хвилі, фазу, поляризацію та напрям розповсюдження, що й збуджуюче зовнішнє випромінювання.

Характеризуючи когерентне випромінювання, вводять такі поняття, як часова та просторова когерентність. *Часова когерентність* визначається зміною фази світлової хвилі у часі у даній точці простору. Проміжок часу, протягом якого зміна фази світлової хвилі є меншою за $\pi$, називають часом когерентності. *Просторова когерентність* характеризується зміною фази світлової хвилі між різними точками простору, через які проходить хвильовий фронт. Якщо різниця фаз між двома точками залишається постійною, то кажуть, що має місце повна когерентність. Якщо ця умова виконується для будь-яких пар точок, то така хвиля характеризується повною просторовою когерентністю.

Електромагнітне випромінювання оптичного діапазону отримують за допомогою джерел випромінювання. Джерела випромінювання можуть бути двох основних типів – теплові та люмінесцентні. *Теплове випромінювання* створюється нагрітими тілами. Воно існує для усіх тіл, температура яких відрізняється від нуля. Інтенсивність і спектральний склад теплового випромінювання залежать від температури. Так, згідно з законом Стефана-Больцмана спектральна щільність енергії випромінювання є пропорційною четвертому ступню абсолютної температури, а спектральна характеристика, яка визначає розподіл інтенсивності випромінювання по його спектру, при збільшенні температури досягає максимуму на менших довжинах хвиль (закон зміщення Віна).

Основними тепловими джерелами випромінювання є лампи розжарювання. Вони можуть бути виготовлені досить мініатюрними, але мають порівняно низький ККД і велику інерційність; конструкція ламп включає вакуумний балон, що погано узгоджується з технологією

напівпровідникових схем. До переваг ламп розжарювання можна віднести низьку вартість, високу температурну та радіаційну стійкість.

Більш розповсюдженими в сучасній оптоелектроніці є джерела випромінювання, що використовують різні види *люмінесценції* (холодного світіння). При люмінесценції енергія, необхідна для випромінювання, може підводитись до тіла будь-яким нетепловим способом. За рахунок енергії зовнішнього впливу частина електронів переходить на більш високі енергетичні рівні. Повернення цих електронів на рівноважні рівні супроводжується випромінюванням фотонів. Фізика процесу люмінесценції має дві особливості: вузький спектр випромінювання та велику кількість способів збудження.

В оптоелектронних приладах у наш час головним чином використовується електролюмінесценція (виникнення світіння під дією електричного поля), фотолюмінесценція (виникнення світіння при опроміненні фотонами) та катодолюмінесценція (виникнення світіння при опроміненні прискореними електронами).

Для оптоелектроніки особливий інтерес викликає електролюмінесценція у твердотільних джерелах випромінювання, матеріалом яких є напівпровідникові з'єднання. Одним з різновидів електролюмінесценції є інжекційна електролюмінесценція, механізм якої лежить в основі роботи основних світловипромінювальних приладів оптоелектроніки – світлодіодів та напівпровідникових лазерних діодів. Інжекційна електролюмінесценція виникає в результаті рекомбінації в об'ємі напівпровідника основних та неосновних носіїв заряду. Така люмінесценція має місце, наприклад, при протіканні прямого струму через *p-n* перехід, що супроводжується інжекцією неосновних носіїв заряду: дірок в *n*-область, а електронів в *p*-область.

Зазвичай випромінювальною є тільки одна область по один бік *p-n* переходу, наприклад, *p*-область. З цією метою в *n*-область вводять більше донорної домішки, ніж акцепторної в *p*-область. У результаті, в такій структурі інжекційний струм є практично однобічним – з *n*-області в *p*-область, і випромінювальна рекомбінація забезпечується електронною складовою $I_n$ повного струму $I$. Ефективність інжекції визначається тим,

наскільки складова струму, що забезпечує інжекцію неосновних носіїв заряду в активну (випромінювальну) область, у нашому прикладі струм $I_n$, відрізняється від повного струму $I$. Ефективність інжекції характеризується коефіцієнтом інжекції $\gamma$:

$$\gamma = \frac{I_n}{I}.$$

Інжектовані в *p*-область електрони рекомбінують там з дірками поблизу *p-n* переходу. При цьому поряд з випромінювальною рекомбінацією, яка забезпечує генерацію оптичного випромінювання, існують механізми безвипромінювальної рекомбінації, внаслідок яких виділяється енергія, що перетворюється в теплові коливання кристалічної решітки. Кількісно ефективність рекомбінації при люмінесценції характеризують внутрішнім квантовим виходом $\eta_к$, який оцінюють відношенням кількості актів випромінювальної рекомбінації до повної кількості актів (випромінювальної та безвипромінювальної) рекомбінації. Іноді внутрішній квантовий вихід визначають відношенням кількості генерованих фотонів до кількості інжектованих в активну область за той самий час неосновних носіїв заряду (у нашому прикладі – електронів в *p*-область). Ефективність інжекційної електролюмінесценції можна оцінити добутком $\gamma \cdot \eta_к$.

Не усі фотони, які були згенеровані у результаті випромінювальної рекомбінації, вийдуть із джерела випромінювання. Основними причинами цього є поглинання світла в об'ємі напівпровідника та явище повного внутрішнього відбиття. Останнє обумовлює те, що назовні вийдуть лише ті світлові промені, що розповсюджуються в межах конуса з півкутом $\theta_0$ біля вершини (рис. 2.1).

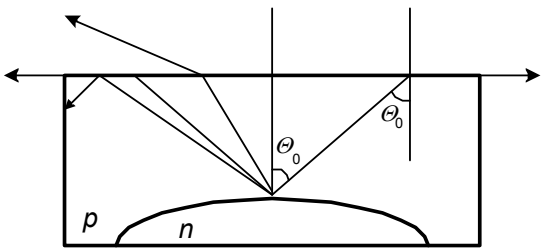



Рисунок 2.1 – Відбиття і заломлення світла при виході з напівпровідника

Кут $\theta_0$ визначається рівністю

$$\theta_0 = arcsin(1/n_0),$$

де $n_0$ - показник заломлення матеріалу, в якому генерується світіння.

Оскільки не всі фотони виходять з джерела випромінювання, воно характеризується зовнішнім квантовим виходом $\eta_{ке}$, який пов'язаний із внутрішнім квантовим виходом $\eta_к$ співвідношенням

$$\eta_{ке} = K_0 \cdot \eta_к, \tag{2.1}$$

де $K_0$ – коефіцієнт, що враховує втрати випромінювання, обумовлені поглинанням та відбиттям світла.

До цього часу мова йшла про гомопереходи, тобто переходи для яких ширина забороненої зони в *p*- та *n*- областях є однаковою. В гетеропереходах (рис. 2.2), що утворюються напівпровідниковими з'єднаннями з різною шириною забороненої зони, існують кращі умови для генерації випромінювання.

Рух носіїв заряду у стані рівноваги гетеростуктури визначається носіями тільки одного типу. Тому при прикладанні прямої напруги має місце однобічна інжекція – тільки носіїв заряду з широкозонного шару (на рис. 2.2, а із шару з шириною забороненої зони $E_2$) у вузькозонний (шар з шириною забороненої зони $E_1$). У результаті коефіцієнт інжекції $\gamma$ в активну (випромінювальну) область (на рис. 2.2 це область з шириною забороненої зони $E_1$) для гетеропереходу дорівнює 1. Важливо відмітити, що однобічна інжекція гетеропереходу не пов'язана зі ступенем легування *p*- та *n*- областей, як це має місце у звичайному (гомогенному) переході. Тому вона зберігається і при значних щільностях прямого струму переходу. Другою особливістю використання гетеропереходу є те, що випромінювання генерується у напівпровідниковому матеріалі з вужчою забороненою зоною, тому воно практично не поглинається у напівпровіднику з більш широкою забороненою зоною. При виведенні

випромінювання через широкозонний напівпровідник вдається суттєво зменшити втрати на поглинання. Ці дві особливості гетеропереходів дозволяють суттєво збільшити зовнішній квантовий вихід $\eta_{ке}$.

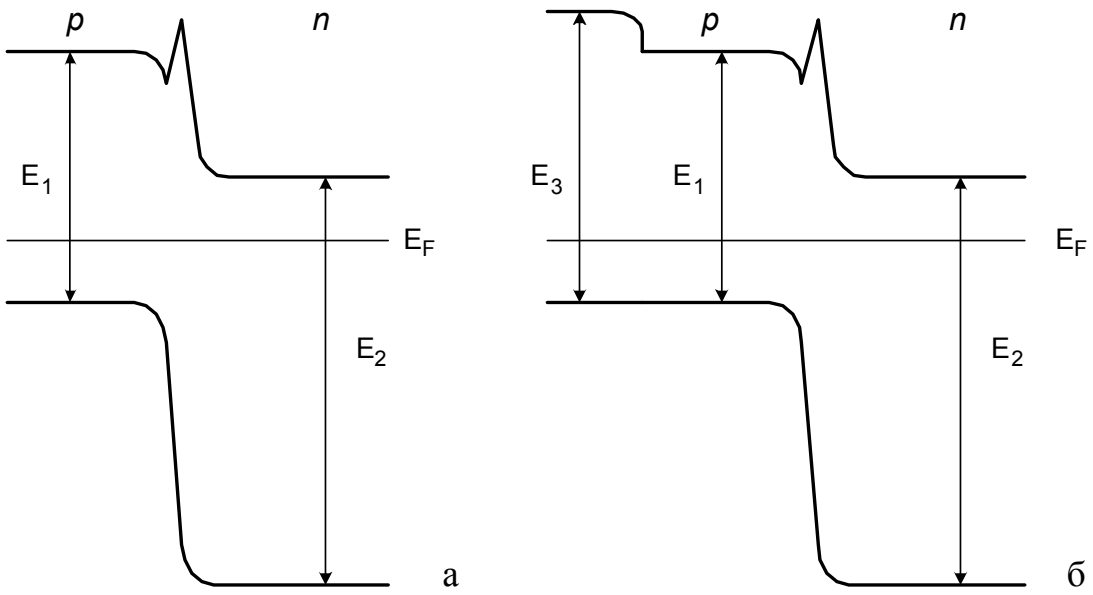



Рисунок 2.2 – Енергетична діаграма одинарної (а) та подвійної (б) гетероструктури

Поряд з одинарною у світловипромінювальних діодах використовується подвійна гетерострутура (рис. 2.2, б), яка містить додатковий широкозонний шар того самого типу провідності, що й активна область (на рис. 2.2, б це шар з шириною забороненої зони $E_3$). Наявність потенціального бар'єра на межі областей із шириною заборонених зон $E_1$ та $E_3$ перешкоджає виходу неосновних носіїв заряду з активної області. Утворюється потенціальна яма, в якій накопичуються інжектовані з широкозонного напівпровідника неосновні носії заряду. Надлишкова концентрація заряду в активній області та однобічна інжекція суттєво підвищують внутрішній квантовий вихід гетероструктури та її швидкодію.

За допомогою гетеропереходів отримують не лише некогерентне, а й когерентне випромінювання.

Зовнішній енергетичний вихід люмінесценції (ККД) визначається як

$$\eta_e = \frac{\eta_{ке} h\nu}{eV}, \qquad (2.2)$$

де $h\nu$ – енергія фотонів;

$eU$ – енергія електронів, що пройшли різницю потенціалів $U$.

Слід зазначити, що внутрішній квантовий вихід $\eta_к$, а значить і пов'язані з ним виразами (2.1) та (2.2) зовнішній квантовий вихід $\eta_{ке}$ та зовнішній енергетичний вихід люмінесценції $\eta_е$, зменшуються зі збільшенням температури.

### 2.1.2 Світлодіоди та нові покоління надяскравих джерел

Світловипромінювальний напівпровідниковий діод (або світлодіод) являє собою діодну структуру на основі гомо- або гетеро- *p-n*-переходу, протікання прямого струму через яку супроводжується генерацією некогерентного оптичного випромінювання. Принцип роботи світлодіода оснований на використанні інжекційної електролюмінесценції, механізм якої був розглянутий у попередньому підрозділі.

Щоб кванти енергії – фотони, які звільняються при рекомбінації, відповідали квантам видимого та ближнього інфрачервоного випромінювання, ширина забороненої зони використовуваного напівпровідника повинна бути відносно великою ($E_g > 1{,}3$ еВ). Тому світлодіоди найчастіше виготовляються на основі з'єднань галію: арсеніду галію (GaAs) та фосфіду галію (GaP).

Додаванням у напівпровідниковий матеріал атомів деяких речовин можна змінювати в певних межах колір світіння світлодіодів. Наприклад, на основі фосфіду галію, легованого певною кількістю цинку, кисню або азоту, одержують світлодіоди зеленого, жовтого і червоного кольорів світіння.

Перші світлодіоди, що мали промислове значення, були створені на основі структур GaAs/Ga Ніком Холоньяком (США). Крім них у 60-і роки минулого століття були створені світлодіоди на основі Ga з червоним і жовто-зеленим світінням. Зовнішній квантовий вихід цих приладів був не більший за 0,1%, а світлова віддача не перевищувала 1..2 лм/Вт. Оскільки довжина хвилі випромінювання знаходилася в межах 500…600нм - області

найвищої чутливості людського ока, порівняно невелика яскравість їхнього світіння була достатньою для застосування цих приладів як сигнальних індикаторів.

Подальше вдосконалення світлодіодів проходило по двох напрямках - збільшення зовнішнього квантового виходу і розширення спектра випромінювання. Великий внесок у цю роботу внесли радянські вчені, зокрема Ж.І. Алфьоров зі співробітниками, які у 70-і роки минулого століття розробили так звані багатопрохідні подвійні гетероструктури. Це дозволило значно збільшити зовнішній квантовий вихід за рахунок обмеження активної області рекомбінації. Використовувалися гетероструктури на основі арсенідів галію-алюмінію (GaAlAs/GaAs). Зовнішній квантовий вихід цих приладів досягав 15% для червоної області спектра та 30 % для інфрачервоної.

Дослідження інших гетероструктур призвели до створення світлодіодів, що випромінюють в інших областях спектра. Так, на початку 90-х років минулого століття були створені світлодіоди на основі багатопрохідних подвійних гетероструктур в системі AlGalnP на підкладках з GaAs або GaP із червоно-жовтогарячим, жовтим і жовто-зеленим кольором світіння. Вони мали зовнішній квантовий вихід до 55% і світлову віддачу до 20 лм/Вт, що значно перевищує світлову віддачу лампи розжарювання. Так, світлова віддача лампи розжарювання з червоним світлофільтром складає усього 3 лм/Вт, із жовтим - 10 лм/Вт у той час як сучасні надяскраві червоні світлодіоди дають понад 30 лм/Вт. Утім, і це не рекорд: для жовто-жовтогарячих надяскравих світлодіодів вже досягнутий результат у 100 лм/Вт.

Довгий час розвиток світлодіодів стримувався відсутністю приладів, що випромінюють у синьому діапазоні. Нітридні з’єднання групи $A^{III}B^{V}$ відкрили шлях до створення високоефективних світлодіодів із зеленим, синім, фіолетовим та ультрафіолетовим випромінюванням. За допомогою багатошарових гетероструктур на основі нітриду індію-галію (InGaN), що випромінюють у синьо-зеленій області спектра, вдалося домогтися зовнішнього квантового виходу до 20% і впритул наблизитися за ефективністю до люмінесцентних ламп (світлова віддача 70...90 лм/Вт).

Винахід синіх світлодіодів замкнув "RGB-коло". Стало можливим отримання будь-якого кольору у тому числі і білого. При цьому використовуються як окремі світлодіоди різних кольорів, так і трьохкристальні світлодіоди, що поєднують кристали червоного, синього і зеленого кольорів світіння в одному корпусі.

Основою більш дешевого світлодіода білого кольору світіння є структура на основі нітриду індію-галію (InGaN), що випромінює на довжині хвилі 470 нм (синій колір), і нанесений зверху на неї люмінофор, що випромінює в широкому діапазоні видимого спектра, який покриває зелені і червоні ділянки спектра. Такі світлодіоди набагато дешевші трикристальних (трикристальні світлодіоди зазвичай використовуються для створення повнокольорових засобів відображення інформації), мають гарну кольоропередачу та світловіддачу до 20 лм/Вт, яка є порівнянною зі світловіддачею ламп розжарювання. Вже створенні білі світлодіоди потужністю 5 Вт з потоком у 120 лм.

Ще один метод отримання білого світла - збудження тришарового (з червоним, зеленим та синім кольором світіння) люмінофора світлодіодом з ультрафіолетовим спектром випромінювання.

Крім високої світлової віддачі, малого енергоспоживання, слабкої залежності параметрів випромінювання від температури і можливості отримання будь-якого кольору випромінювання, сучасні світлодіоди мають інші суттєві переваги, зокрема, фантастичний термін служби. Виробники декларують термін служби до 100 тисяч годин, або 11 років безперервної роботи. Крім того, за порівнянням зі звичайними лампами, у світлодіодів відсутня скляна колба, що обумовлює їх високу механічну міцність і надійність. Мале тепловиділення і низька напруга живлення гарантують високий рівень безпеки їх використання.

Перераховані вище переваги обумовлюють широке використання над’яскравих світлодіодів у багатьох сферах:

- автомобільні стоп-сигнали;
- автомобільні та залізничні світлофори;
- навігаційні системи на судноплавних річках та морських портах;

– обмежуючі вогні на висотних будівлях та аеропортах;

– великоформатні повнокольорові екрани для вокзалів, аеропортів, стадіонів, що здатні відтворювати не лише текст або графіку, а й відео;

– системи атмосферного оптичного зв'язку;

– системи дистанційного керування;

– охоронні системи.

Не зважаючи на те, що на основі світлодіодів можуть бути створенні освітлювальні прилади з малим споживанням енергії, малим тепловиділенням, відсутністю ультрафіолетового випромінювання, високою вібростійкістю та довговічністю, відсутністю спеціальних патронів та відбивачів, дотепер відсоток переходу на світлодіодні джерела освітлення залишається невеликим. Головна причина цього — поки що занадто висока ціна. Відношення долар/люмен для звичайної лампи розжарювання складає приблизно 0,001. Для сучасних надяскравих світлодіодів цей показник досягає лише 0,1-0,05 долара за люмен.

Сьогодні для створення освітлювальних приладів використовуються світлодіоди, в яких підвищення світлової віддачі досягається або за рахунок об'єднання кількох кристалів в одному корпусі, або за рахунок використання одного кристала зі збільшеною площею. Конструкція таких світлодіодів містить пластинчатий тепловідвід та відбивачі бокового випромінювання кристалів, які погоджені з півсферичним полімерним куполом.

Система характеристик та параметрів світлодіодів логічно випливає з функціонального призначення і фізичних принципів їх роботи. Основними світловими характеристиками та параметрами світлодіодів, що характеризують їх як джерела оптичного випромінювання є:

а) *випромінювальна характеристика* – залежність потоку випромінювання (для інфрачервоних світлодіодів) або сили світла (для світлодіодів, що випромінюють видиме світло) від прямого струму світлодіода; випромінювальна характеристика світлодіодів є такою, що практично лінійною зростає зі збільшенням струму у всьому діапазоні робочих струмів;

б) *спектральна характеристика* - залежність інтенсивності випромінювання (потоку випромінювання або сили світла) від довжини хвилі випромінюваного потоку;

в) *інтенсивність випромінювання* – характеризує потужність випромінювання $P_{вип}$ (для інфрачервоних світлодіодів) або силу світла $I_v$ (для світлодіодів, що випромінюють видиме світло) у напрямі, перпендикулярному випромінювальній поверхні при заданому прямому струмі;

г) *яскравість* – відношення сили світла до площі випромінювальної поверхні (може вказуватися для світлодіодів, що випромінюють видиме світло);

д) *діаграма спрямованості* – характеризує залежність інтенсивності випромінювання від напряму випромінювання (кута, що відраховується від нормалі до випромінювальної поверхні);

е) *довжина хвилі випромінювання,* $\lambda_{max}$ – довжина хвилі, яка відповідає максимальній інтенсивності випромінювання, тобто довжина хвилі, на якій спектральна характеристика має максимум;

ж) *ширина спектра випромінювання* $\Delta\lambda$ – діапазон хвиль в спектрі випромінювання, для яких інтенсивність випромінювання є не нижчою за 0,5 максимуму спектральної характеристики.

При розгляданні світлодіода як елемента електричного кола використовуються такі основні характеристики та параметри:

а) *вольт-амперна характеристика* – залежність сили струму, що протікає через світлодіод, від прикладеної до нього напруги;

б) *постійна пряма напруга* – значення напруги на світлодіоді при протіканні крізь нього постійного прямого струму;

в) *максимально допустимий постійний прямий струм* – максимальне значення постійного струму, при якому забезпечується задана надійність при тривалій роботі;

г) *максимально допустимий імпульсний прямий струм* – максимальне значення струму, при протіканні якого протягом заданого часу $\tau$ як при однократній, так і при періодичній дії, забезпечується задана надійність при тривалій роботі;

д) *максимально допустима зворотна постійна напруга* – максимальне значення постійної напруги, яка прикладена до світлодіода у зворотному напрямі, при якій забезпечується задана надійність при тривалій роботі;

е) *максимально допустима зворотна імпульсна напруга* – максимальне пікове значення зворотної напруги на світлодіоді, включаючи як однократні викиди, так і ті, що періодично повторюються;

ж) *максимально допустима потужність розсіювання* – максимальна потужність розсіювання, при якій не настане тепловий пробій світлодіода.

з) *швидкодія* - визначається імпульсними параметрами: часом наростання/спаду імпульсу випромінювання при стрибкоподібних змінах прямого струму світлодіода та часом затримки імпульсу випромінювання відносно до імпульсу струму.

Крім зазначених світлодіоди характеризуються ще конструктивними та експлуатаційними параметрами. До основних конструктивних параметрів відносяться форма та розміри корпуса. Основними експлуатаційними показниками є максимальна і мінімальна робоча температура та гарантована довговічність (визначається за 10, 30 або 50%-м спадом інтенсивності випромінювання).

Як і у будь-якого іншого напівпровідникового елемента у світлодіодів існує залежність основних параметрів від зовнішньої температури. Зі збільшенням температури інтенсивність випромінювання та спад напруги на світлодіоді зменшуються, а довжина хвилі випромінювання дещо збільшується. При цьому найбільш сильна температурна залежність спостерігається у інтенсивності випромінювання. Ця залежність є практично лінійною і характеризується можливою зміною інтенсивності у 2-3 рази в інтервалі робочих температур.

Вольт-амперна характеристика світлодіода є аналогічною до вольт-амперної характеристики звичайного кремнієвого діода: вона має пряму ділянку, що круто зростає. На цій ділянці динамічний опір є малим і не перевищує кількох Ом. Малим є і статичний опір світлодіода. Тому при вмиканні світлодіодів в електричні кола необхідно вживати заходити щодо

обмеження прямого струму, а як джерела електричного сигналу використовувати джерела струму.

Допустимі зворотні напруги для світлодіодів є не достатньо великими, тому якщо світлодіод повинен працювати у колі змінного струму, для запобігання пробою послідовно з ним необхідно вмикати випрямний діод.

Важливою особливістю напівпровідникових світловипромінювальних діодів є притаманна їм деградація, тобто постійне зменшення інтенсивності випромінювання при тривалому протіканні прямого струму. Зниження інтенсивності випромінювання через деградацію підпорядковується експоненціальному закону:

$$I(t) = I(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

де $I(0)$ – початкова інтенсивність випромінювання;

$\tau$ – постійна часу, що характеризує швидкість процесу деградації.

Швидкість деградації збільшується з підвищенням температури та при роботі на підвищених прямих струмах.

Поряд з розвитком напівпровідникових світлодіодів останнім часом надзвичайно швидко розвиваються розробки органічних світлодіодів (OLED — organic light emission diodes). Органічний світлодіод складається з ряду тонких органічних плівок, які розташовані між двома тонкоплівковими провідниками. При пропусканні через органічний матеріал електричного струму він починає світитися. Колір, ефективність та інтенсивність світіння залежать від використаних органічних матеріалів.

Сьогодні використовуються два класи органічних матеріалів. Це полімери і мікромолекули. При полімерній технології світловипромінювальні частинки напилюються на підкладку у рідкому вигляді, а при мікромолекулярній, яка є найбільш поширеною, - конденсуються із пари. Мікромолекулярні світлодіоди перевершують полімерні за ефективністю та терміном служби, проте обладнання для полімерної OLED-технології є менш дорогим.

Перевагами органічних світлодіодів є низькі робочі напруги, висока яскравість світіння, мала споживана потужність, широкий діапазон робочих температур, висока технологічність, мала товщина та вага. Крім того, на відміну від напівпровідникового світлодіода, який дає точкову емісію, органічний випромінює усією поверхнею. При цьому яскравість світіння по всій поверхні є рівномірною. Це дозволяє обійтися без використання корпуса з лінзою для фокусування випромінювання у заданому тілесному куті.

Основними недоліками органічних світлодіодів є висока чутливість до вологості, поки ще не достатньо високий термін служби, труднощі отримання білого кольору світіння.

### 2.1.3 Напівпровідникові інжекційні лазери

Основним джерелом когерентного випромінювання, яке широко застосовується в системах оптичного зв'язку, оптоелектронних пристроях обробки та зберігання даних, є напівпровідниковий інжекційний лазер.

Напівпровідниковий інжекційний лазерний діод являє собою діодну структуру на основі *p-n*-переходу, інжекція носіїв заряду в якій викликає генерацію вимушеного випромінювання.

Як було зазначено у пункті 2.1.1, умовою виникнення когерентного випромінювання є вимушені переходи електронів з вищих енергетичних рівнів на нижчі. Такі переходи пов'язані з дією зовнішнього випромінювання. При цьому усі активні атоми випромінюють майже одночасно, взаємозв'язано і так, що випромінювані ними фотони не відрізняються від тих, які їх утворили. Поряд з процесом вимушеного випромінювання фотона електроном, що знаходяться на верхньому енергетичному рівні, відбувається процес поглинання такого самого фотона електроном, що знаходиться на нижньому енергетичному рівні. Оскільки імовірності обох процесів однакові, для генерації випромінювання необхідно, щоб кількість збуджених електронів була більшою за кількість електронів, що перебувають у стані теплової рівноваги. Лише при цій умові процес утворення нових фотонів буде переважати над процесом їх

поглинання, тобто буде мати місце так зване оптичне підсилення.

В умовах термодинамічної рівноваги заселеність електронами енергетичних рівнів підпорядковується статистиці Больцмана, згідно з якою верхні рівні енергії заселені електронами менше, ніж нижні. При взаємодії випромінювання з такою речовиною відбудеться поглинання випромінювання. Щоб одержати ефект оптичного підсилення, необхідно вживати спеціальні заходи для того, щоб кількість електронів на верхніх енергетичних рівнях була більшою за їх кількість на нижніх. Стан речовини, при якому на верхніх енергетичних рівнях знаходиться більше електронів, ніж на нижніх, називається станом з *інверсією населеностей*. Середовище, в якому здійснена інверсія населеностей, називається *активним середовищем*. Процес збудження речовини, що приводить до виникнення активного середовища, називається *накачкою*. Для усіх типів лазерів значення енергії накачки є набагато більшим за енергію лазерного випромінювання. Проте порівняно низький ККД генерації випромінювання повністю компенсується його унікальністю – дуже малим розходженням світлового пучка, високою спрямованістю та високою монохроматичністю.

Для того, щоб розглянутий оптичний підсилювач перетворився в лазер – генератор випромінювання, необхідно ввести позитивний зворотний зв’язок. Необхідний для генерації зворотний зв’язок здійснюється розміщенням активного середовища в оптичному резонаторі, в якому можуть збуджуватися стоячі електромагнітні хвилі. Такий резонатор утворюється двома паралельними дзеркалами, одне з яких є напівпрозорим для виведення випромінювання. У якійсь точці резонатора неминуче відбувається спонтанний перехід електрона активного середовища з верхнього рівня на нижній, тобто мимовільно випускається фотон. Якщо резонатор налаштований на частоту цього фотона, то фотон не виходить з резонатора, а, багаторазово відбиваючись від його стінок, породжує безліч собі подібних фотонів, що, у свою чергу, впливають на активну речовину, викликаючи все нові акти вимушеного випромінювання таких самих фотонів. У результаті такого "розмноження" фотонів у резонаторі накопичується енергія, частина якої виводиться назовні через напівпрозоре дзеркало. Якщо в якийсь момент потужність змушеного випромінювання

перевищує потужність втрат енергії на нагрівання стінок резонатора, розсіювання випромінювання і т.п., а також на корисне випромінювання в зовнішній простір, то в резонаторі виникають незатухаючі коливання, тобто збуджується генерація.

У напівпровідниковому інжекційному лазері, на відміну від лазерів інших типів, використовуються випромінювальні переходи не між ізольованими рівнями енергії атомів, молекул та іонів, а, так само як і у світлодіоді, між енергетичними зонами – зоною провідності та валентною зоною. Ця відмінність визначає важливу особливість лазерного діода – його мініатюрність. Крім того, напівпровідникові лазерні діоди характеризуються високою ефективністю перетворення електричної енергії в когерентне випромінювання, малою інерційністю, можливістю використання різних напівпровідникових з'єднань, що дозволяє отримувати випромінювання з довжинами хвиль широкого спектрального діапазону.

Накачка інжекційного лазера відбувається за рахунок високих рівнів інжекції, для чого використовують сильно леговані напівпровідники. Інжекційний струм викликає інверсію населеностей, при якій низ зони провідності заповнений електронами у більшому ступені, ніж верх валентної зони. Роль оптичного резонатора виконують дзеркальні сколи граней кристала, перпендикулярних площині *p-n*-переходу. Основними матеріалами для виготовлення інжекційних напівпровідникових лазерів є з'єднання арсеніду галію.

Інжекційний лазерний діод може реалізовуватися на основі гомогенного *p-n*-переходу (гомолазер). У такому лазері існують дуже великі втрати випромінювання в активному середовищі. Через це, для отримання генерації необхідні великі струми, які викликають сильне нагрівання кристалу і швидку його руйнацію. Тому при кімнатних температурах гомолазери можуть працювати лише в імпульсному режимі, тобто використовуватися лише для генерацій поодиноких імпульсів. Значно більш ефективними є інжекційні напівпровідникові лазерні діоди на основі гетеропереходів (гетеролазери), які потребують значно менших струмів накачки. Як гетеропереходи можуть використовуватися одинарні, подвійні, а також чотирьох та п'яти шарові гетероструктури. Подвійна

гетероструктура є класичною. У порівнянні з одинарною вона характеризується меншими струмами накачки та більш високими потужностями випромінювання. Якщо її порівнювати з чотири- або п'яти-шаровою, то вона є набагато простішою за технологією виготовлення.

Перевагами інжекційних напівпровідникових лазерів є:

- малі габаритні розміри;
- високий ККД перетворення енергії накачки в оптичне випромінювання (до 50 %), що наближається до теоретичної межі;
- низькі напруги та струми збудження, сумісні з параметрами інтегральних схем;
- можливість керування потужністю випромінювання та робота в безперервному режимі;
- можливість генерації необхідної спектральної лінії (забезпечується вибором матеріалу з необхідною шириною забороненої зони);
- сумісність з твердотільною мікроелектронною груповою технологією, що забезпечує високу продуктивність, низьку вартість виготовлення та створює можливість інтегрувати лазерні випромінювачі з іншими пристроями.

До основних недоліків інжекційних лазерів можна віднести:

- недостатньо високу когерентність випромінювання (за порівнянням з газовими лазерами), що обумовлюється високою щільністю активного середовища та малою довжиною резонатора;
- відносно малу потужність генерованого випромінювання;
- зменшення потужності випромінювання при підвищенні температури.

Основні характеристики інжекційних лазерів.

1. *Потужність випромінювання* – характеризує енергію, що переноситься випромінюванням в одиницю часу.

2. *Довжина хвилі випромінювання* – середня довжина хвилі спектра лазерного випромінювання.

3. *Ширина лінії лазерного випромінювання* – різниця довжин хвиль, яким відповідає 50% максимальної інтенсивності випромінювання.

4. *Розходженість випромінювання* – плоский або тілесний кут, що характеризує кутовий розподіл потужності випромінювання.

5. *Спрямованість лазерного випромінювання* – відношення довжини хвилі генерованого випромінювання до лінійного розміру резонатора.

6. *Пороговий струм* – мінімальний струм, при якому підсилення випромінювання за рахунок вимушених переходів дорівнює його втратам, тобто мінімальний струм, при якому починається генерація випромінювання.

7. *Ефективність* або *ККД* – відношення енергії або середньої потужності світлового випромінювання, до енергії або середньої потужності, що споживається від електричного кола.

8. *Час готовності* – час, який необхідний для досягнення лазером експлуатаційних параметрів з моменту його вмикання.

9. *Максимальна частота модуляції* – максимальна частота вхідного імпульсного сигналу, на якій може працювати лазер.

Так само як і для світлодіодів, для інжекційних напівпровідникових лазерів існує залежність його параметрів від температури, зміна якої призводить до зсуву спектра випромінювання. Від температури також суттєво залежить такий важливий параметр лазера, як пороговий струм, який майже лінійно зростає зі збільшенням температури.

## 2.2 Фотоприймачі

Приймачем оптичного випромінювання (фотоприймачем) називається оптоелектронний прилад, призначений для перетворення енергії оптичного випромінювання в електричну енергію.

В залежності від фізичних явищ, покладених в основу роботи, та особливостей конструктивного виконання усі приймачі оптичного випромінювання можуть бути поділені на три групи: фотоелектричні, фотоелектронні та теплові.

Фотоелектричні приймачі випромінювання основані на використанні змін електрофізичних параметрів напівпровідникового приладу, що

обумовлені утворенням додаткових носіїв заряду у напівпровіднику під дією оптичного випромінювання (внутрішній фотоефект).

Принцип дії фотоелектронних приладів оснований на використанні фотоемісії електронів з фотокатода (зовнішній фотоефект). У деяких видах фотоелектронних приладів використовується внутрішній фотоефект (відікони) і тепловий ефект (піровідікони).

Робота теплових приймачів випромінювання основана на використанні теплового ефекту – зміні опору чутливого елемента при зміні його температури, що є наслідком поглинання випромінювання (болометри). До теплових фотоприймачів також можна віднести прилади, що використовують піроелектричний ефект – залежність від температури спонтанної поляризації сегнетоелектричних матеріалів. Піроелектричні приймачі можна розглядати як генератори напруги, внутрішній опір яких має ємнісний характер, тому вони придатні для реєстрації випромінювання змінної інтенсивності.

Фотоелектричні та теплові фотоприймачі поділяються на прилади, що лише перетворюють оптичне випромінювання в електричний сигнал, та прилади, які крім цього здійснюють обробку останнього (фотоприймальні та теплові пристрої).

Для практичного застосування у розглядуваних у даному навчальному посібнику схемах інтерес викликають фотоелектричні приймачі, тому у подальшому будемо розглядати саме їх.

### 2.2.1 Фотоелектричні явища у твердому тілі

При проходженні світла через речовину його інтенсивність знижується. Взаємодія світла з речовиною може відбуватися без зміни енергії фотонів і зі зміною. Процеси взаємодії без зміни енергії фотонів містять у собі відбиття, заломлення, розсіювання, пропускання світла, обертання площини поляризації та інше. Процеси взаємодії, що супроводжуються зміною енергії фотонів, включають у себе різні види поглинання. Усі механізми поглинання можна розділити на дві великі групи. До першої групи відносяться процеси, при яких енергія фотона

перетворюється в інший вид енергії без зміни концентрації вільних носіїв. Наприклад, поглинання випромінювання може призводити до утворення фотонів з меншою енергією, тобто до випромінювання світла з більшою довжиною хвилі. В іншому випадку поглинання світла може привести до утворення фононів (квантів енергії теплових коливань кристалічної рішітки). Ще одним видом поглинання без зміни концентрації носіїв заряду є поглинання вільними носіями заряду, у результаті чого зростає їх кінетична енергія (електрони переходять на вищі енергетичні рівні).

До другої групи відносяться механізми поглинання, в результаті яких зростає концентрація вільних носіїв заряду – електронів та дірок (внутрішній фотоефект). Явища, що відносяться до цієї групи, називаються фотоелектричними. При поглинанні електроном фотона з енергією не меншою за ширину забороненої зони напівпровідника, електрон набуває енергію достатню для його переходу з валентної зони у зону провідності. У результаті утворюється нова пара електрон-дірка. Таке поглинання називається *власним*. Крім власного, можливе *домішкове* поглинання, при якому енергія фотонів іде на іонізацію атомів домішки. У цьому випадку енергія фотона не повинна бути меншою за глибину залягання домішкового рівня у забороненій зоні. Оскільки концентрація домішок є меншою за власну концентрацію, і усі домішкові рівні при кімнатних температурах є в основному іонізованими, кількість нових носіїв заряду, що можуть утворитися при власному поглинанні, є набагато більшою за кількість носіїв заряду, що можуть утворитися при домішковому. Тому у фотоприймачах зазвичай використовується власне поглинання.

Ефективність протікання фотоелектричних процесів характеризується квантовим виходом η, який дорівнює відношенню кількості генерованих пар електрон–дірка, до кількості поглинених фотонів.

У фотоелектричних фотоприймачах використовують два прояви внутрішнього фотоефекту: ефект фотопровідності та фотогальванічний ефект. *Ефект фотопровідності* полягає в утворенні фотоносіїв у результаті чого збільшується провідність напівпровідникового елемента (зменшується опір).

Умовою виникнення *фотогальванічного ефекту* є наявність

внутрішнього електричного поля, наприклад поля *p-n*-переходу . Внутрішнє електричне поле розділяє фотоносії, що утворюються під впливом оптичного випромінювання. Просторово розділені фотоносії різних знаків – електрони та дірки – створюють фото-ЕР.С.

### 2.2.2 Основні параметри та характеристики фотоприймачів

Для оцінювання технічних властивостей і ефективності використання фотоприймачів застосовують систему параметрів і характеристик.

Основні параметри фотоприймачів.

1. *Чутливість* - відношення зміни вихідної електричної величини (фотоструму або фотонапруги), викликаної падаючим на фотоприймач випромінюванням, до кількісної характеристики цього випромінювання. Оптичне випромінювання може характеризуватися енергетичними та світловими параметрами. Відповідно до цього розрізняють чутливість до потоку випромінювання, до світлового потоку, до опромінення та до освітлення. У загальному випадку чутливість залежить від параметрів випромінювання. Для врахування цієї залежності вводять поняття статичної та динамічної диференціальної чутливості. *Статична чутливість* визначається відношенням постійних значень зазначених вище величин. *Диференціальна чутливість* визначається відношенням малих приростів цих величин. Чутливість також залежить від довжини хвилі оптичного випромінювання. Тому розрізняють *інтегральну чутливість*, тобто чутливість до немонохроматичного (складного) потоку випромінювання заданого спектрального складу, та *монохроматичну чутливість*, тобто чутливість до монохроматичного випромінювання.

2. *Короткохвильова (довгохвильова) межа спектральної чутливості* - найменша (найбільша) довжина хвилі монохроматичного випромінювання, при якій монохроматична чутливість фотоприймача дорівнює 0,1 від її максимального значення.

3. *Поріг чутливості* – середнє квадратичне значення світлового потоку, при якому середнє квадратичне значення електричного сигналу дорівнює середньому квадратичному значенню шуму.

4. *Проявна здатність* – величина зворотна до порога чутливості.

5. *Робоча напруга* – постійна напруга на фотоприймачі, при якій забезпечуються номінальні значення його параметрів при тривалій роботі за заданих експлуатаційних умов.

6. *Максимально допустима розсіювана потужність* – максимальна потужність, розсіювана у фотоприймачі, при якій відхилення його параметрів від номінальних значень не перевищує вказаних границь при тривалій роботі в заданих експлуатаційних умовах.

7. *Темновий опір* – опір фотоприймача за відсутності падаючого на нього випромінювання в діапазоні його спектральної чутливості.

8. *Світловий опір* – опір фотоприймача, виміряний через певний інтервал часу після початку дії випромінювання, яке створює на фотоприймачі опроміненість або освітленість заданого значення.

9. *Темновий струм* – струм, що проходить через фотоприймач при вказаній напрузі на ньому за відсутності потоку випромінювання в діапазоні спектральної чутливості.

10. *Фотострум* – струм, що проходить через фотоприймач при вказаній напрузі на ньому і обумовлений дією потоку випромінювання із заданим спектральним розподіленням.

11. *Гранична частота* – частота синусоїдально-модульованого потоку випромінювання, при якій чутливість фотоприймача падає до значення 0,707 від чутливості при немодульованому випромінюванні.

Основні характеристики фотоприймачів.

1. *Спектральна характеристика чутливості* – залежність чутливості фотоприймача від довжини хвилі монохроматичного випромінювання, що падає на нього. Вона визначає спектральну область застосування приладу.

2. *Енергетична (світлова) характеристика* – залежність фотоструму (фотонапруги) від потоку випромінювання, що падає на фотоприймач. Іноді під енергетичною характеристикою розуміють залежність інтегральної або монохроматичної чутливості від інтенсивності випромінювання.

3. *Вольт-амперна характеристика* – залежність струму фотоприймача від прикладеної до нього напруги при заданому потоці випромінювання.

4. *Частотна характеристика* – залежність чутливості від частоти модуляції випромінювання або тривалості імпульсів.

Крім зазначених фотоприймачі характеризуються ще конструктивними та експлуатаційними параметрами. До основних конструктивних параметрів відносяться форма та розміри корпуса, а одним з основних експлуатаційних показників є діапазон робочих температур.

Усі фотоприймачі можна поділити на дискретні (одноелементні) та багатоелементні. До дискретних належать фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори та фототиристори. Багатоелементними фотоприймачами є фоточутливі прилади із зарядовим зв'язком.

### 2.2.3 Фоторезистори

Фоторезистор – оптоелектронний напівпровідниковий приймач випромінювання, принцип дії якого оснований на використанні ефекту фотопровідності. Іншими словами, фоторезистор являє собою опір, значення якого змінюється під впливом оптичного випромінювання. Для виготовлення фоторезисторів використовують напівпровідники з одним типом провідності, зазвичай електронним.

Перевагами фоторезисторів є лінійність вольт-амперної характеристики та двостороння провідність, основним недоліком – мала швидкодія.

### 2.2.4 Фотодіоди

Фотодіод – фотоприймач, фоточутливий елемент якого має структуру напівпровідникового діода.

Класичний фотодіод має структуру на основі *p-n* переходу. При освітленні *p-n* переходу у ньому виникають електронно-діркові пари, які розділяються внутрішнім електричним полем переходу. Внутрішнє електричне поле переходу $E_{вн}$, яке створюється іонами атомів домішки, діє на вільні носії так, що згенеровані світлом електрони накопичуються поблизу переходу в *n*-області, а дірки – в *p*-області. Цей процес схематично зображений на рис. 2.3.

Розділені полем $E_{вн}$ і накопичені поблизу переходу фотоносії створюють поле $E_ф$, яке спрямовано протилежно полю $E_{вн}$. Результуюча напруженість електричного поля зменшується, внаслідок чого висота потенціального бар'єра на *p-n*-переході знижується. Таким чином, під дією світла на переході виникає фотоелектрорушийна сила (фото ЕРС), яка зміщує перехід у прямому напрямі.

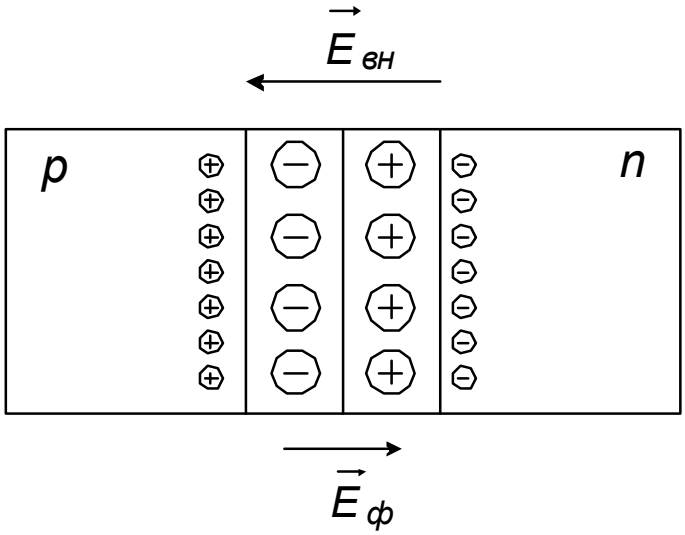



Рисунок 2.3 – Структура фотодіода при дії випромінювання

Якщо фотодіод увімкнути в електричне коло, то у колі при освітленні фотодіода буде протікати фотострум, утворений рухом носіїв заряду, що виникають у напівпровіднику під дією оптичного випромінювання. Оскільки згенеровані світлом електрони під дією внутрішнього електричного поля $E_{вн}$ рухаються у бік *n*-області, а дірки – у бік *p*-області, то напрям фотоструму збігається з напрямом зворотного струму *p-n*-переходу.

Вольт-амперна характеристика фотодіода описується виразом:

$$I = I_ф(\Phi) - I_0\left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1\right), \qquad (2.3)$$

де $I_ф(\Phi)$ – фотострум, який є функцією інтенсивності зовнішнього освітлення;

$I_0$ – тепловий (зворотний) струм *p-n*-переходу;

$q$ – елементарний заряд;

$U$ – напруга на діоді;

$k$ – постійна Больцмана;

$T$ – абсолютна температура.

Сімейство вольта-амперних характеристик фотодіода, що відповідають різним рівням зовнішньої освітленості, зображене на рис. 2.4.

При відсутності зовнішнього освітлення $I_\phi(\Phi)$ дорівнює нулю, і вольт-амперна характеристика фотодіода нічим не відрізняється від вольт-амперної характеристики звичайного діода.

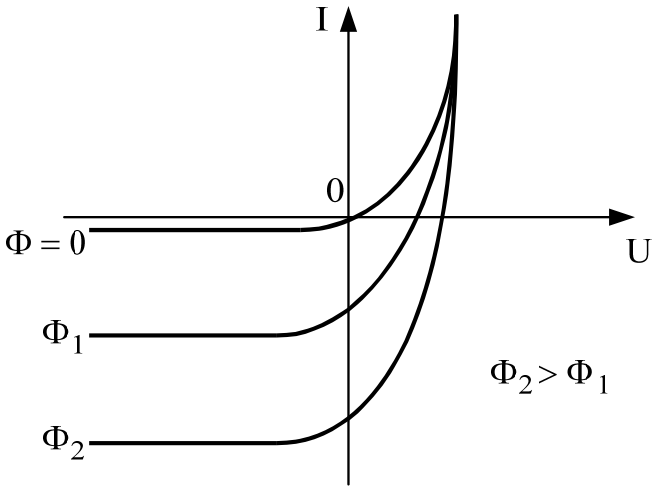



Рисунок 2.4 – Вольт-амперні характеристики фотодіода

При негативних напругах на діоді значення експоненти у виразі (2.3) майже не відрізняється від нуля і результуючий струм дорівнює

$$I = I_\phi(\Phi) + I_0 . \qquad (2.4)$$

Чим більша інтенсивність світлового потоку, тим більше носіїв заряду виникає у напівпровіднику в одиницю часу, а значить тим більше значення фотоструму. Як правило вже при незначних інтенсивностях оптичного випромінювання фотострум $I_\phi(\Phi)$ набагато перевищує тепловий струм $I_0$. Тому в умовах освітлення зворотний струм фотодіода визначається значенням фотоструму.

При незначних прямих напругах (частки вольта), при яких значення експоненти є порівнянним із значенням фотоструму, струм через фотодіод визначається як прикладеною прямою напругою, так і інтенсивністю оптичного випромінювання.

При значних позитивних напругах значення експоненти буде набагато більшим за значення фотоструму. У результаті прямий струм, що тече через фотодіод, буде визначатися лише значенням прикладеної позитивної напруги.

Як видно з графіків на рис. 2.4, при значенні струму фотодіода такому, що дорівнює нулю, спад напруги на діоді в умовах освітлення відрізняється від нуля. Напруга на діоді у цьому випадку дорівнює напрузі фотоЕРС, значення якої можна знайти з виразу (2.3), приймаючи $I = 0$:

$$U_{\phi} = \frac{kT}{q} \ln\left( \frac{I_{\phi}(\Phi) + I_0}{I_0} \right)$$

Таким чином, підводячи підсумки, бачимо, що використання фотодіода як елемента чутливого до оптичного випромінювання можливе у двох варіантах. У першому варіанті фотодіод вмикається в електричне коло з подачею на нього негативної напруги. Такий режим називається *фотодіодним*. У фотодіодному режимі використовується залежність зворотного струму фотодіода від інтенсивності оптичного випромінювання. Як видно з рисунка 2.4 в робочому діапазоні робочих зворотних напруг фотострум практично не залежить від значення напруги.

У другому варіанті фотодіод вмикається в пасивне електричне коло, що не містить джерела напруги. Такий режим використання фотодіода називається *вентильним*. Якщо опір кола є достатньо великим, то струм у колі буде наближатися до нуля. У цьому випадку напруга у колі буде дорівнювати напрузі фотоЕРС $U_{\phi}$. Зі зменшенням опору зовнішнього кола, напруга на фотодіоді буде зменшуватися, а струм зростати. Максимальне значення струму буде відповідати струму короткого замикання і визначатися виразом (2.4). Вентильний режим може використовуватися для

оптичної генерації електричної енергії (сонячні батареї).

Розглянуті особливості фотодіода як фоточутливого елемента пов'язані з наявністю *p-n*-переходу, поле якого розділяє згенеровані світлом носії заряду. Оскільки ширина області *p-n*-переходу є достатньо вузькою, а сам він залягає на деякій відстані від поверхні, на яку потрапляє випромінювання, основне поглинання випромінювання, а значить і переважне утворення електронно-діркових пар відбуваються в шарі напівпровідника *p*- або *n*- областей. Ці надлишкові електрони та дірки потрапляють під вплив *p-n*-переходу з активної (тієї, що освітлюється) області за рахунок дифузійного або дрейфового переміщення. Відповідно до цього розрізняють дифузійні та дрейфові фотодіоди. *Дифузійні фотодіоди* являють собою структуру з однорідним розподіленням домішки в *p*- та *n*- областях. Тому в такому фотодіоді рух згенерованих світлом носіїв заряду до *p-n*-переходу відбувається за рахунок дифузії.

У *дрейфовому фотодіоді* застосовують неоднорідний розподіл домішки, внаслідок чого виникає внутрішнє електричне поле, яке прискорює рух носіїв до *p-n*-переходу.

Енергетична характеристика діода у фотодіодному режимі у робочому діапазоні інтенсивностей оптичного випромінювання є лінійною. У фотогальванічному режимі при великих значеннях інтенсивності енергетична характеристика суттєво відхиляється від лінійної. Це пов'язано з тим, що внаслідок генерації фотоЕРС зменшується напруженість електричного поля на *p-n*-переході, а значить знижується ефективність розділення електронно-діркових пар. Максимально можливе значення напруги фотоЕРС обмежується контактною різницею потенціалів.

Швидкодія фотодіода визначається в основному тривалістю дифузії фотоносіїв до *p-n*-переходу. Збільшення швидкодії досягається зменшенням товщини активної області, за рахунок чого зменшується відстань від місця генерації фотоносіїв до області *p-n*-переходу. Проте при такому підході поряд зі збільшенням швидкодії має місце зниження чутливості фотодіода, пов'язане зі звуженням шару напівпровідника, в якому можуть утворюватися електронно-діркові пари. Підвищення швидкодії фотодіода при збереженні високої чутливості стало можливим при переході до більш

складних напівпровідникових структур.

***P-i-n* фотодіод**

Фотодіод зі структурою *p-i-n* являє собою тонкі низькоомні *p*- та *n*-області, між якими розташований протяжний збіднений *i*-шар. Розміри збідненого шару вибираються так, щоб у ньому поглинулося усе оптичне випромінювання, що досягнуло його. Питомий опір *i*-області у $10^6$-$10^7$ разів більший, ніж опір областей *p*- та *n*-типів. Тому практично вся прикладена зворотна напруга падає на *i*-шарі, створюючи область сильного поля, що прискорює утворені під дією оптичного випромінювання носії. Така структура створює основу для отримання швидкодіючого та чутливого фотоприймача, оскільки процес дифузії фотоносіїв до *p-n*-переходу, який є характерним для звичайної діодної структури, замінюється дрейфом носіїв через *i*-область у сильному електричному полі. Завдяки цьому *p-i-n* фотодіоди є найбільш поширеними фотоприймачами, що знаходять широке застосування.

Основними перевагами *p-i-n* діодів є такі:

- поєднання високої чутливості та високої швидкодії;
- висока чутливість у довгохвильовій області спектра, обумовлена широкою *i*-областю;
- мала бар'єрна ємність;
- малі робочі напруги у фотодіодному режимі.

До основних недоліків *p-i-n* фотодіодів відносяться високі вимоги до чистоти *i*-області та технологічна несумісність з інтегральними схемами.

**Фотодіод з бар'єром Шотткі**

Фотодіоди з бар'єром Шотткі (контакт метал-напівпровідник) є ще одним типом фотоприймачів з високою швидкодією та чутливістю. Подібні бар'єри можуть бути отримані на різних напівпровідникових матеріалах, у тому числі і тих, для яких неможливо створити *p-n*-переходи.

Як напівпровідникові матеріали для реалізації фотодіодів з бар'єром Шотткі найбільше практичне використання отримали кремній та арсенід галію. Як метал найчастіше використовується плівка золота товщиною до 0,01 мкм.

Якщо електронний напівпровідник контактує з металом, у якого робота виходу електронів менша за роботу виходу для напівпровідника, то певна кількість електронів переходить з напівпровідника в метал. Іонізована донорна домішка у напівпровіднику утворює шар позитивного просторового заряду, що має високий опір. При вмиканні діода у зворотному напрямку (мінус на металі) ширина області просторового заряду збільшується.

Світло на прилад спрямовують з боку металевої плівки. При достатньо малій товщині плівки, вона виявляється практично прозорою, і основна частина випромінювання поглинається в області просторового заряду, в якій існує сильне електричне поле. Електронно-діркові пари, які виникають у результаті поглинання випромінювання, швидко розділяються полем.

Особливістю бар'єрів Шотткі є можливість реєстрації випромінювання з енергією фотонів, меншою за ширину забороненої зони напівпровідника. Таке випромінювання не утворює у напівпровіднику додаткові електронно-діркові пари, але збуджує електрони металу. При енергії фотонів, більшій за висоту потенціального бар'єра контакту метал-напівпровідник, електрони металу набувають енергію, достатню для подолання бар'єра і переходу у напівпровідник. Відповідно довгохвильова межа спектральної чутливості фотодіода з бар'єром Шотткі зсувається у бік більш довгих хвиль.

З іншого боку, мала товщина металевої плівки створює умови для генерації фотоносіїв заряду в області об'ємного заряду короткохвильовим випромінюванням, для якого характерна мала глибина поглинання. Тому короткохвильова межа спектральної характеристики для фотодіодів з бар'єром Шотткі знаходиться на менших довжинах хвиль.

Таким чином, за порівнянням з фотодіодом на основі *p-n*-переходу, фотодіоди з контактом метал-напівпровідник характеризуються значно більшою шириною спектральної характеристики.

Іншими важливими перевагами фотодіодів з бар'єром Шотткі є такі:

- поєднання високої чутливості та високої швидкодії;
- малий опір, що зменшує час перезаряду бар'єрної ємності;

- простота створення випрямних фоточутливих структур на різних напівпровідникових з'єднаннях, що дозволяє керувати висотою потенціального бар'єра.
- сумісність з технологією інтегральних схем.

**Фотодіод з гетеропереходом**

Фотодіоди з гетерострктурою (гетерофотодіоди) є одним з найперспективніших типів напівпровідникових фотоприймачів. Типова конструкція гетерофотодіода зображена на рисунку 2.5.

З боку освітлюваної поверхні знаходиться шар з напівпровідникового матеріалу з широкою забороненою зоною та високою концентрацією домішки. За широкозонним шаром знаходиться активний фоточутливий шар з матеріалу з вужчою забороненою зоною. Далі іде контактний шар з такою ж шириною забороненої зони, як і в активному шарі, але з більшою концентрацією домішки.

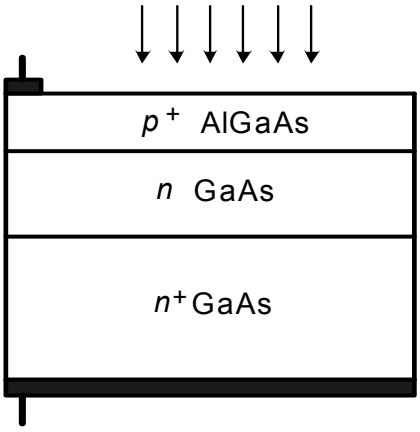



Рисунок 2.5 – Зонна діаграма фотодіода з гетероперехода

Така структура нагадує структуру *p-i-n* фотодіода з тією різницею, що для її реалізації використані напівпровідникові матеріали з різною шириною забороненої зони.

При освітленні гетерофотодіода оптичним випромінюванням з енергією фотонів, меншою за ширину забороненої зони першого широкозонного шару, воно з мінімальними втратами досягає активного шару. Товщина активного шару вибирається так, щоб забезпечити

поглинання у ньому усього випромінювання.

Фотодіоди з гетеропереходом зберігають основні переваги розглянутих вище структур – поєднання високої швидкодії та високої чутливості, малі робочі напруги.

Іншими перевагами використання гетероструктури є:

- можливість при відповідному виборі напівпровідників працювати у будь-якій області спектра; це пов'язано з тим, що робоча довжина хвилі визначається різницею в ширині забороненої зони;
- високий ККД, що наближається до 100%;
- великий температурний діапазон та радіаційна стійкість;
- фізична та технологічна сумісність з приладами інтегральної оптики.

Основний недолік таких гетерофотодіодів – складність технології виготовлення.

**Лавинний фотодіод**

Лавинний фотодіод відноситься до фотоприймачів з внутрішнім підсиленням. Він працює при зворотній напрузі, близькій до пробивної. Внаслідок цього утворені під дією оптичного випромінювання носії заряду прискорюються сильним електричним полем, набуваючи достатньої енергії для ударної іонізації атомів. Електрони та дірки, утворені при зіткненні, у свою чергу продовжують процес іонізації. Процес збільшення концентрації носіїв заряду, а значить і струму, має лавиноподібний характер. Лавинне множення концентрації нерівноважних електронів та дірок у сильному електричному полі шару просторового заряду *p-n*-переходу буде мати місце тоді, коли ширина області просторового заряду перевищує довжину вільного пробігу носіїв заряду.

Підсилення первинного фотоструму у лавинному діоді характеризується коефіцієнтом лавинного множення:

$$M = I_ф/I_{ф0}, \qquad (2.5)$$

де $I_ф$ – вихідний струм фотодіода з врахуванням множення;

$I_{ф0}$ – вихідний струм фотодіода без множення.

Коефіцієнт лавинного множення в лавинному фотодіоді є коефіцієнтом підсилення фотоструму. Коефіцієнт підсилення залежить від напруги на переході і визначається за емпіричною формулою Міллера

$$M = 1/\left[1-(U/U_{проб})^n\right], \qquad (2.6)$$

де $U$ - напруга на *p-n*-переході;

$U_{проб}$ – пробивна напруга;

$n$ - коефіцієнт, що приймає значення від 1,5 до 6 в залежності від матеріалу фотодіода та типу *p-n* переходу.

З виразу (2.6) випливає, що коефіцієнт підсилення залежить від прикладеної напруги, що є не прийнятним для практичного використання. Тому для надійної роботи лавинного фотодіода необхідний дуже високий ступінь стабілізації напруги живлення.

З врахуванням виразів (2.5) та (2.6) можна отримати вираз для вольт-амперної характеристики лавинного діода:

$$I_ф = I_{ф0}/\left[1-(U/U_{проб})^n\right].$$

З наведеного виразу видно, що існує теоретична можливість отримання будь-якого значення вихідного струму. Проте на практиці цього не відбудеться. При великих значеннях $U$ сильний струм веде до розігріву напівпровідника. У результаті збільшується темновий струм і зменшується фотострум, що веде до перетворення електричного пробою у тепловий і, як наслідок, руйнації приладу.

Перевагами лавинних фотодіодів є: наявність внутрішнього великого підсилення та висока швидкодія.

Основні недоліки лавинних фотодіодів:

- складність та унікальність виготовлення, а значить, висока

вартість;

- високі робочі напруги та великі втрати потужності;
- необхідність стабілізації робочої напруги та температури;
- значний розкид параметрів у окремих зразках.

Незважаючи на те, що використання лавинних фотодіодів пов'язано з певними труднощами, вони знаходять застосування для реєстрації слабких оптичних сигналів, і ось чому. Здається, що, використовуючи чутливий фотоприймач, наприклад *p-i-n* фотодіод, та електронний підсилювач з дуже великим коефіцієнтом підсилення, можна зафіксувати достатньо слабкий сигнал. Однак це не так. Шуми вхідних каскадів підсилювачів є більшими за шуми *p-i-n* фотодіодів. Тому мінімальне значення оптичного сигналу, яке може бути зафіксоване у такому випадку, буде відповідати рівню, при якому корисний вихідний сигнал фотодіода буде більший за шуми попереднього каскаду. Це значення буде значно перевищувати поріг чутливості фотодіода. У лавинному фотодіоді поряд з внутрішнім підсиленням корисного сигналу відбувається таке ж підсилення шуму. Тому, якщо шум лавинного фотодіода виявиться не меншим за шум попереднього каскаду, то поріг чутливості схеми буде порівнянним з порогом чутливості фотодіода. У зв'язку з цим лавинні фотодіоди мають переваги перед *p-i-n* фотодіодами в умовах прийому мінімально розрізнювальних сигналів.

**Інжекційні та S-фотодіоди**

Інжекційні фотодіоди відносяться до фотоприймачів з внутрішнім підсиленням. Структуру діода характеризує наявність довгої базової області. Довжина бази з високоомного напівпровідника в кілька разів перевищує довжину дифузії неосновних носіїв струму. Фотодіод працює при прямому зміщенні.

У темновому режимі більша частина прикладеної до діода напруги спадає на базі. При дії оптичного випромінювання фотони, поглинаючись у базі, утворюють нові додаткові носії заряду. Опір бази зменшується, що приводить до перерозподілу напруги між базою та *p-n* переходом. З підвищенням напруги *p-n*-перехід інжектує більший струм, який, у свою

чергу, ще більше зменшує опір бази і т.д. В результаті цього процесу відбувається підсилення первинного фотоструму.

В інжекційних фотодіодах з високоомного матеріалу (Ge, Si, GaAs) чутливість на 5...6 порядків вища, ніж у звичайних фотодіодів, а пороговий струм та інерційність приблизно такі, як і у фоторезисторів. Крім того, порівняно з лавинними фотодіодами для інжекційних фотодіодів знижуються вимоги до стабільності напруги живлення та струму.

Структура та принцип дії S–фотодіодів аналогічні інжекційному фотодіоду. Фотони світла створюють носії струму в довгій базовій області, що стимулює ріст інжекційного струму та приводить до підсилення фотоструму.

Вольт-амперна характеристика S-фотодіода наведена на рисунку 2.6. При освітленні S–фотодіода напруга, при якій зростання струму через фотодіод відбувається зі зменшенням спаду напруги на ньому, знижується зі збільшенням інтенсивності оптичного випромінювання.

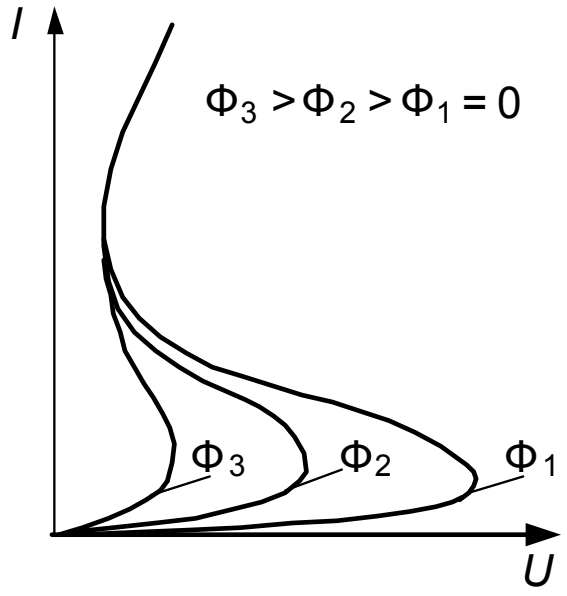



Рисунок 2.6 – Вольт-амперна характеристика S–фотодіода

На S–фотодіоді зручно створювати фотореле. Для цього на фотоприймач подають напругу зміщення, яка відповідає вибраному порогу освітленості, при перевищенні якого різко зростає струм через S–діод. Фотоприймач переходить у другий стійкий стан (верхня гілка ВАХ), який зберігається після затемнення приладу.

### 2.2.5 Фототранзистори

Фототранзистор – напівпровідниковий приймач випромінювання, що за структурою подібний до транзистора та забезпечує внутрішнє підсилення сигналу. Фототранзистор можна представити таким, що складається з фотодіода і транзистора (рис. 2.7). Фотодіодом є освітлювана частина переходу база-колектор, транзистором – частина структури, розташована безпосередньо під емітером. Оскільки фотодіод і колекторний перехід транзистора конструктивно об'єднані, то фотострум підсумовується з колекторним струмом. Базовий електрод може бути вимкненим.

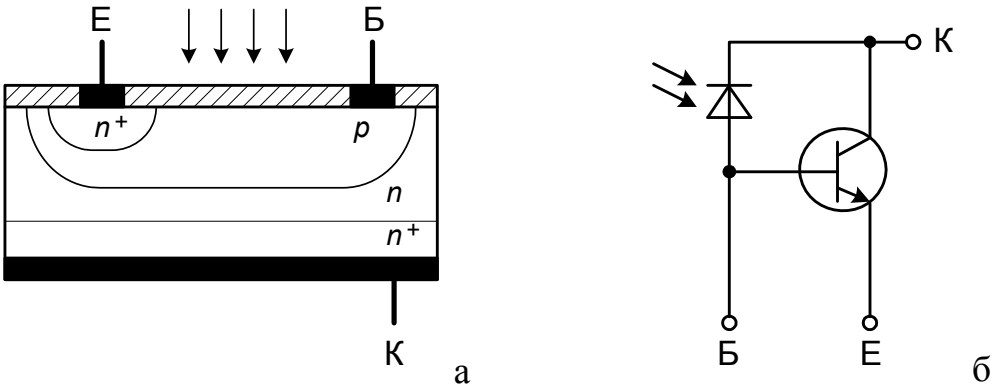



Рисунок 2.7 – Будова фототранзистора:
а – структура *n-p-n* типу; б – еквівалентна схема.

При освітленні бази в ній виникають електронно-діркові пари. Так само як і у фотодіоді, пари, що досягли в результаті дифузії колекторного переходу, розділяються полем переходу, неосновні носії з бази рухаються в колектор, при цьому його струм збільшується. Основні носії залишаються в базі, знижуючи її потенціал відносно емітера. При цьому на емітерному переході створюється додаткова пряма напруга, що викликає додаткову інжекцію з емітера в базу і відповідне збільшення струму колектора

При вмиканні фототранзистора в схемі із загальним емітером при вимкненій базі, маємо вихідний струм у $\beta$ разів більший за струм фотодіода ($\beta$ - коефіцієнт передачі струму бази транзистора в схемі із загальним емітером). Відповідно у $\beta$ разів збільшується і чутливість. Струм може бути підсилений у кілька сотень разів, тому чутливість фототранзистора у багато разів більша за чутливість фотодіода.

Ще більше підсилення і, як наслідок, ще більше збільшення чутливості, може бути досягнено у складеному фототранзисторі (рис. 2.8).

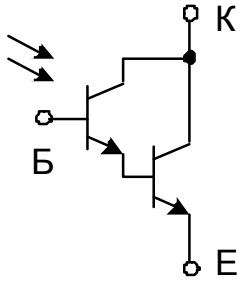



Рисунок 2.8 – Складений фототранзистор

Коефіцієнт передачі струму для складеного фототранзистора

$$\beta \approx \beta_1 \cdot \beta_2 ,$$

де $\beta_1$ та $\beta_2$ – коефіцієнти передачі струмів баз для компонентів складеного фототранзистора.

У результаті чутливість складених фототранзисторів підвищується зазвичай більш ніж у 1000 разів в порівнянні з чутливістю фотодіодів.

Спектральні характеристики фототранзисторів близькі до характеристик фотодіодів, виготовлених з аналогічного матеріалу. За порівнянням з фотодіодами фототранзистори мають гіршу температурну стабільність, оскільки одночасно з фотострумом підсилюється і темновий струм. Гранична частота фототранзистора менша від граничної частоти фотодіода у $\beta$ разів, що обмежує область їх застосування в основному в пристроях автоматики та керування силовими колами.

Перевагами фототранзисторів є: наявність внутрішнього підсилення (висока фоточутливість), схемотехнічна гнучкість, яка обумовлена наявністю третього електрода.

### 2.2.6 Фототиристори

Фототиристор – напівпровідниковий приймач випромінювання з двома стійкими станами (високоомним та низькоомним), перемикання

якого у стан низького опору відбувається під дією оптичного сигналу. Структура фототиристора є подібною до структури звичайного тиристора (рис. 2.9, а), що містить три *p-n*-переходи, з яких середній називають колекторним, а два крайніх – емітерними. Зовнішні області називаються емітерами, а внутрішні – базами.

Тиристор вмикається так, щоб колекторний перехід був ввімкнений у зворотному напрямку, а обидва емітерних – у прямому. При такому вмиканні переходів тиристор можна зобразити у вигляді двох послідовно ввімкнених транзисторів p-n-p і n-p-n з позитивним зворотним зв'язком через загальні бази і колектори (рис. 2.9, б).

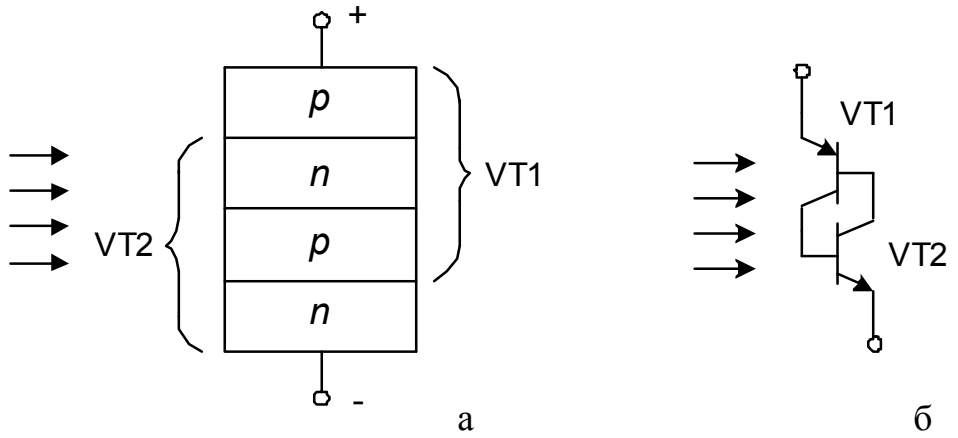



Рисунок 2.9 – Тиристор: а – структура; б –двотранзисторна модель)

При збільшенні напруги на тиристорі зворотний струм колекторного переходу, який є струмом фототиристора, зростає. Зростання струму веде до накопичування об’ємних зарядів в базових областях тиристора. Дірки, що інжектуються емітерним переходом транзистора VT1, переносяться полем колекторного переходу у базу транзистора VT2 і створюють там позитивний заряд. Аналогічно, електрони, що інжектуються емітерним переходом транзистора VT2, переносяться полем колекторного переходу у базу транзистора VT1 і створюють там негативний заряд. Накопичення основних носіїв заряду в базах транзисторів розпочинає процес їх відкривання. При деякому значенні напруги на тиристорі накопичені у базах заряди стають достатніми для того, щоб транзистори почали працювати в активному режимі. У результаті коефіцієнт підсилення у колі

зворотного зв’язку стає більшим за одиницю. Базові струми транзисторів лавиноподібно зростають (незначне збільшення базового струму кожного транзистора через коло зворотного зв’язку повертається ще більшим збільшенням) і обидва транзистори швидко відкриваються. Лавиноподібне зростання струму через структуру призводить до відкривання тиристора, у результаті чого усі три переходи виявляються зміщеними у прямому напряму, і загальний опір фототиристора стає малим.

Для переведення фототиристора у високоомний стан, необхідно зменшити його струм до деякого значення. При цьому розпочнеться зворотний процес лавиноподібного перемикання, який завершиться тим, що обидва транзистори виявляться закритими, а колекторний перехід буде зміщений у зворотному напряму.

Сильний позитивний зворотний зв'язок є причиною появи на вольт-амперній характеристиці фототиристора ділянки з негативним динамічним опором (рис. 2.10). Як видно з вольт-амперної характеристики фототиристор може знаходитися в одному з двох стійких станів, закритому високоомному і відкритому низькоомному. Перехід з одного стійкого стану у другий відбувається стрибкоподібно (на негативній ділянці ВАХ стан приладу є нестійким). При цьому переході опір тиристора і струм через нього змінюються у $10^6$-$10^7$ разів: приблизно від $10^8$ Ом (струм близько $10^{-6}$ А) у закритому стані до $10^{-1}$ Ом (струм – від $10^{-1}$ до 1 А) – у відкритому.

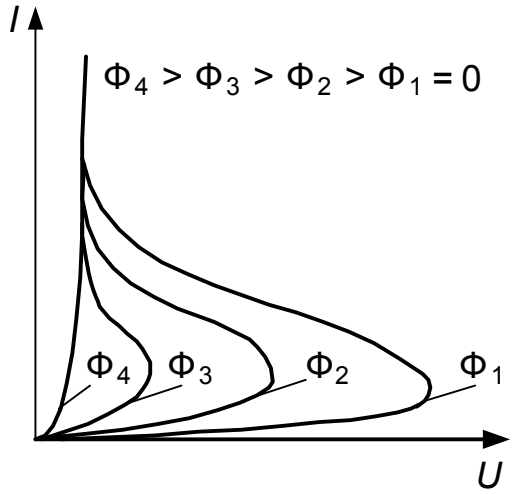



Рисунок 2.10 – Вольт-амперні характеристики тиристора

При освітленні фототиристора оптичне випромінювання поглинається в обох базах. Електричне поле колекторного переходу розділяє згенеровані світлом заряди. Це прискорює процес накопичення зарядів у базах. У результаті перемикання фототиристора у відкритий стан відбувається при менших значеннях напруги. З ростом інтенсивності оптичного випромінювання напруга перемикання зменшується. Таким чином, світло відіграє роль керуючого електричного сигналу звичайного тиристора з третім виводом (від бази) і дозволяє безконтактним способом керувати струмами у різних електричних колах.

Мінімальний час, необхідний для перемикання, називається часом затримки $t_з$. Він дорівнює сумі часів дифузії неосновних носіїв заряду через бази. Експериментально величина $t_з$ визначається мінімальною тривалістю імпульсу світла, що вмикає фототиристор. З ростом інтенсивності світла час затримки зменшується. Однією з причин цього є збільшення коефіцієнта дифузії при високих рівнях інжекції носіїв заряду

Головна перевага фототиристорів – спроможність перемикання значних струмів та напруг слабкими світловими сигналами. У порівнянні з фототранзисторами фототиристори підтримують великі значення комутованих струмів і напруг, більш високу у порівнянні зі складеними фототранзисторами швидкодію (10-30 мкс). Основна сфера застосувань фототиристорів – керування великими струмами в «силовій» оптоелектроніці.

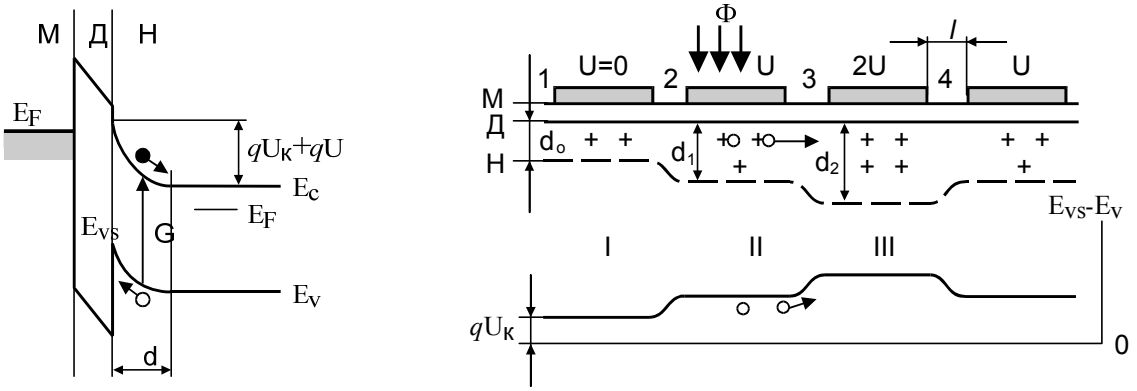
### 2.2.7 Багатоелементні фотоприймачі

В ряді випадків необхідно не тільки відмітити наявність пучка світла або його інтенсивність, але й зафіксувати фотоелектричним способом оптичне зображення, що має певний розподіл інтенсивності світла по площині. Це можна досягнути, виготовивши екран, що містить багато мініатюрних фотоприймачів, які перетворюють світлові потоки у відповідні електричні сигнали. Записана таким чином оптична інформація деякий час зберігається, а потім "зчитується" тим або іншим способом. Електричні

сигнали від різних комірок екрана можуть бути послідовно передані в інше місце і використані для відтворення зображення об’єкта.

Сьогодні для введення зображень використовуються багатоелементні фотоприймачі на основі приладів із зарядовим зв’язком (ПЗЗ). З фізичної точки зору ПЗЗ цікаві тим, що електричний сигнал у них поданий не струмом або напругою, як у більшості інших твердотільних приладів, а зарядом.

Спрощено прилад із зарядовим зв'язком можна розглядати як матрицю близько розташованих конденсаторів, утворених структурою метал-діелектрик-напівпровідник (МДН) (рис. 2.11, а). При відповідній послідовності тактових імпульсів напруги на електродах МДН-конденсаторів зарядові пакети можна переносити між сусідніми елементами приладу. Структура складається із шару кремнію n-типу (підкладка), шару двоокису ізолювального кремнію і набору пластин-електродів.




а б

Рисунок 2.11 – Енергетична схема МДН-структури при наявності напруги (а) і серія взаємодіючих елементів, до яких прикладені різні напруги (б). Штрихова лінія - границя області просторового заряду, $E_{vs}$-$E_v$ - глибини потенціальних ям для дірок

Якщо в структурі прикладають напругу *U* (мінус на металі), то частина домішкових електронів виводиться з напівпровідника *n*-типу, що призводить до появи шару позитивного об’ємного заряду товщиною *d*. Товщина цього шару збільшується з ростом *U*.

Електрони, які виникають при освітленні МДН-структури,

відводяться в об'єм напівпровідника, а дірки накопичуються біля межі з діелектриком. Кількість цих дірок (тобто загальний позитивний заряд) залежить від інтенсивності світла і часу його дії. Якщо теплова генерація пар незначна, накопичений заряд (тобто інформація, задана світлом) може зберігатись тривалий час, оскільки електронів у збідненій області немає. Носії, що генеруються за межами збідненої області, повільно рухаються — дифундують і, рекомбінують перш, ніж потрапляють під дію поля збідненої області. Носії, що генеруються поблизу збідненої області, можуть дифундувати в сторони і можуть потрапити під сусідній електрод. У червоному й інфрачервоному діапазонах довжин хвиль ПЗЗ мають роздільну здатність гіршу, ніж у видимому діапазоні. Це обумовлено тим, що фотони інфрачервоного та червоного випромінювання проникають глибше в кристал кремнію і зарядовий пакет розмивається.

На рис. 2.11, б зображений ланцюг МДН-структур, що є частиною рядка багатоелементного фоточутливого екрана. У випадку I на структуру не подана зовнішня напруга і наявність збідненого електронами шару товщиною $d_0$ пов'язана з контактною різницею потенціалів $U_к$. Випадок II відповідає присутності зовнішньої напруги і освітлення структури крізь напівпровідниковий металевий електрод (затвор). Накопичений за час освітлення заряд дірок може бути зсунутий вздовж ланцюга структур, якщо на сусідній елемент подано більш високу напругу (випадок III). У цьому випадку глибина потенціальної ями для дірок більша, і вони внаслідок дифузії перейдуть від другого елемента до третього. У проміжку між заслонами 2 і 3 присутнє прискорювальне поле дірки, яке проникає і в область накопичення дірок, тому перетікання дірок до елемента 3 може бути достатньо швидким.

Таким чином, електричний сигнал від елемента 2, пропорційний інтенсивності Ф і часу дії світла, що падає на цей елемент, може бути проведений по ланцюгу елементів і виведений у зовнішній ланцюг. Аналогічним чином можуть бути отримані відеосигнали від інших елементів рядка і елементів інших рядків.

Мікроскопічні фоточутливі елементи розміщені в рядку так близько ($l \approx 3$ мкм), що вони можуть взаємодіяти, передаючи один одному заряди.

Звідси назва подібних пристроїв - прилади із зарядовим (або об’ємним) зв’язком. Цей зв’язок між МДН-структурами здійснюється через загальну для всіх структур товщину напівпровідників.

Двовимірний масив (матрицю) пікселів одержують за допомогою стоп-каналів, що розділяють електродну структуру ПЗС на стовпці. Стоп-канали – це вузькі області, сформовані спеціальними технологічними прийомами в приповерхневій області, що перешкоджають розтіканню заряду під сусідні стовпці.

Якість усіх фотоприймальних матриць ПЗЗ залежить від ефективності переносу зарядів від комірок до кінцевого підсилювача. Оскільки заряди з пикселів, що розташовані далеко від кінцевого підсилювача, повинні перенестися на сотні і тисячі кроків, то ефективність передачі зарядів повинна бути максимально наближеною до одиниці. Ця вимога набуває особливого значення при низьких рівнях зарядів (наприклад, при слабкому освітленні), коли мала втрата зарядів може призвести до суттєвого спотворення зображення.

Основними типами приладів із зарядовим зв'язком є ПЗЗ із поверхневим каналом і ПЗЗ з прихованим каналом. У ПЗЗ із поверхневим каналом заряди зберігаються і переносяться біля межі розділу напівпровідник-діелектрик. Для поверхневого шару характерна велика кількість дефектів, що негативно впливає на ефективність переносу зарядів. Оскільки повністю усунути поверхневі дефекти неможливо, характеристики приладів покращують за рахунок того, що зарядові пакети зберігаються і передаються на деякій відстані від поверхні. Це реалізується у ПЗЗ з прихованим каналом. Завдяки спеціальному легуванню підкладки в ній формується канал з протилежним типом провідності.

Більшість типів ПЗЗ-матриц, що виготовляються на промисловій основі, орієнтовані на застосування в телебаченні. Як правило, такі матриці складаються з двох ідентичних областей – області накопичення та області збереження. Область збереження захищена від впливу світла світлонепроникним покриттям. Під час зворотного ходу променя кадрової розгортки зображення, сформоване в області накопичення, швидко переноситься в область збереження і, потім, поки експонується наступний

кадр, зчитується порядково з частотою рядкової розгортки. Такі прилади називаються ПЗЗ із кадровим переносом. Завдяки низькій ціні вони знаходять широке використання в побутовій відеотехніці. Проте прилади з кадровим переносом можна використовувати для зйомок у добре освітлених умовах.

Фотоприймальні пристрої на ПЗЗ використовують малу енергію під час зчитування, потребують невеликих напруг (10-20 В) і при кількості елементів ~ $1 \cdot 10^5$ см$^{-2}$ можуть мати хорошу роздільну здатність (40 ліній на 1 мм). Оскільки чутливі елементи використовують не *p-n*-переходи, а поверхневі бар'єри, полегшується підбір області спектральної чутливості приладу шляхом вибору матеріалу з відповідною шириною забороненої зони ($\Delta E \leq h\nu$).

### 2.3 Оптрони

Оптроном називається оптоелектронний прилад, який містить джерело і приймач випромінювання, що оптично і конструктивно пов'язані між собою.

Основним джерелом випромінювання, що використовується в оптронах, є інфрачервоний світлодіод. Для деяких пристроїв як джерела можуть використовуватися напівпровідникові лазери. Як фотоприймач можуть бути використані фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фототиристори. Відповідно до цього розрізняють резисторні, діодні, транзисторні та тиристорні оптрони. Саме фотоприймач є тим основним елементом оптопари, що визначається її схемотехнічним застосуванням. Середовищем оптичного каналу може служити повітря, скло, пластмаса або інша прозора речовина. Усі елементи оптопар повинні бути погоджені за спектральними характеристиками, швидкодією, температурними властивостям, габаритами.

Елементарний оптрон, що містить одне джерело і один приймач, називається *оптопарою*. Більш складні оптрони, об'єднані в інтегральних мікросхемах з одним або декількома погоджувальними та підсилювальними пристроями, називають оптоелектронними інтегральними мікросхемами.

Принцип дії оптопари оснований на подвійному перетворенні енергії. У світловипромінювачі енергія вхідного електричного сигналу перетворюється в оптичне випромінювання, а у фотоприймачі, навпаки, оптичний сигнал викликає електричний струм або напругу. Таким чином оптопара являє собою прилад з електричними вхідними та вихідними сигналами, тобто зв'язок із зовнішньою схемою для оптопари є електричним. Всередині оптопари зв'язок входу з виходом здійснюється за допомогою оптичних сигналів.

Принципові переваги оптопар, що обумовлені використанням фотонів як носіїв інформації, полягають у забезпеченні високої електричної ізоляції між входом та виходом, односпрямованості потоку інформації, широкої смуги пропускання. Крім зазначених, іншими важливими перевагами оптопар є:

- можливість безконтактного (оптичного) керування електронними об'єктами та обумовлені цим різноманітність та гнучкість рішень управління;
- нечутливість оптичних каналів зв'язку до дії електромагнітних полів, що у випадку оптопар з протяжним оптичним каналом обумовлює високу завадозахищеність, а також виключає взаємні наведення;
- можливість керування вихідним сигналом оптопари шляхом дії на оптичний канал і, як наслідок, створення різних датчиків та інших пристроїв.

Основними недоліками оптопар є низький ККД, пов'язаний з подвійним перетворенням енергії, та значна залежність параметрів від температури.

В системі параметрів оптопар можна виділити чотири групи: вхідні параметри (електричні параметри випромінювача), вихідні параметри (електричні параметри фотоприймача), передатні параметри (параметри передачі сигналу з входу на вихід) та параметри ізоляції.

Передатні параметри характеризують ефективність передачі електричного сигналу з входу оптопари на вихід. Ефективність передачі енергії сигналу описують коефіцієнтом передачі (зазвичай за струмом), а швидкість передачі сигналу – часовими параметрами.

Коефіцієнт передачі є основним параметром, який характеризує передачу електричного сигналу з входу оптопари на її вихід, і визначається відношенням вихідного струму оптопари $I_{вих}$ до її вхідного струму $I_{вх}$:

$$K_I = \frac{I_{вих}}{I_{вх}}.$$

Залежність $I_{вих} = f(I_{вх})$ називається передавальною функцією.

Тиристорна оптопара працює лише у ключовому режимі, і параметр $K_I$ для неї не має сенсу. Передавальна характеристика тут визначається вхідним струмом, при якому фототиристор вмикається.

Швидкодію оптрона характеризують часом перемикання

$$t_п = t_н + t_{сп},$$

де $t_c$ та $t_{сп}$ – часи наростання і спаду сигналу на виході оптрона.

Швидкодія також може характеризуватися граничною частотою перемикання.

Параметрами електричної ізоляції оптопар є: максимально допустима пікова та статична напруги ізоляції між входом та виходом, опір ізоляції та прохідна ємність.

В електричних схемах оптопари знаходять широке застосування як елементи електричної розв’язки завдяки тому, що для їх успішного функціонування високий ККД не є обов’язковим. Серед оптопар, що використовуються для розв’язки, найбільш широко подані такі, у яких як фотоприймачі застосовані фототранзистор, фотодіод та фототиристор.

Діодні та транзисторні оптопари використовуються головним чином у колах передачі цифрових інформаційних сигналів. Критерієм якості служить параметр $K_I/t_{зат}$($t_{зат}$ – час затримки розповсюдження сигналу). За цим критерієм діодні оптопари значно кращі, ніж транзисторні. Цим і обумовлено домінування діодних оптопар в обчислювальній техніці, техніці передачі та обробки інформації. Слід зазначити, що діодні оптопари

мають малий коефіцієнт передачі, і тому потребують обов'язкового підсилення вихідного сигналу.

Важливим різновидом діодних оптопар є так звані диференціальні оптопари – прилади, в яких один світловипромінювач діє на два ідентичних фотодіоди.

В пристроях безконтактного керування є зручними транзисторні оптопари, а для оптичної комутації високовольтних сильнострумових кіл - тиристорні.

Слід зазначити, що зводити призначення оптопар тільки до забезпечення електричної ізоляції між вхідними та вихідними колами було б не правильно. Введення за допомогою оптопар оптичного керування дозволяє отримати електронні пристрої з особливими параметрами та характеристиками. Введення електричного та (або) оптичного зворотного зв'язку дозволяють реалізовувати функції генерації, запам'ятовування та деякі інші.

Волоконно-оптичні канали зв'язку можна розглядати як своєрідні оптопари, в яких світловипромінювач та фотоприймач є рознесеними у просторі на значні відстані.

Ще одним типом оптопар є оптопари з відкритим оптичним каналом, в яких світловипромінювач та фотоприймач змонтовані окремо один від одного, а зв'язок між ними, у переважній більшості, здійснюється через повітря.

Нарешті середовище між світловипромінювачем та фотоприймачем може бути виконано з матеріалу, світлопропускання якого змінюється під дією зовнішніх впливів.

**Контрольні питання**

1. У чому полягає різниця між енергетичними та світловими величинами? Чи існує зв'язок між ними, якщо так, то який?

2. Перерахуйте основні енергетичні та світлові характеристики оптичного випромінювання. В яких одиницях вони вимірюються?

3. У чому полягає різниця між тепловими та люмінесцентним

джерелами випромінювання? Які види люмінесценції найбільш широко використовують в оптоелектроніці?

4. Охарактеризуйте спонтанне та стимульоване випромінювання. Як на вашу думку, чи можна отримати когерентне випромінювання за допомогою теплового джерела?

5. Чи існує різниця у зовнішньому квантовому виході випромінювання при інжекційній електролюмінесценції в гомо- та гетеропереході? Якщо так, то з чим це пов'язано?

6. Враховуючи, що зі збільшенням температури ширина забороненої зони напівпровідника зменшується, поясність як це може вплинути на довжину хвилі генерованого випромінювання та на ККД електролюмінесценції.

7. Охарактеризуйте світлодіод як світловипромінювач. Чи буде спостерігатися генерація оптичного випромінювання у світлодіоді при прикладанні до нього зворотної напруги? Відповідь поясніть.

8. Охарактеризуйте інжекційний лазерний діод як світловипромінювач. Що спільного між ним та світлодіодом? Чим вони відрізняються?

9. Чи буде різниця в довжині хвилі оптичного випромінювання, що дозволить спостерігати фотоелектричні явища у напівпровіднику при власному та домішковому поглинанні? Відповідь поясніть.

10. Чи можливе спостереження фотогальванічного ефекту у фоторезисторі? Відповідь поясніть.

11. При прикладанні яких напруг до фотодіода, прямих чи зворотних, можливе його використання як фотоприймача? Відповідь поясніть.

12. Чому швидкодія фотодіода на основі *p*-*n*-переходу є меншою за швидкодію інших типів фотодіодів?

13. Чи відрізняються спектральні характеристики фотодіодів на основі *p*-*n*-переходу та фотодіодів з бар'єром Шотткі? Якщо так, то чим та чому?

14. За якими характеристиками і як фототранзистор відрізняється від фотодіода?

15. Чим відрізняються багатотоелементні фотоприймачі від дискретних з точки зору функціональних можливостей?

16. Охарактеризуйте оптопару як оптоелектронний прилад.

17. Чи будуть відрізнятися коефіцієнти передачі струму діодної та транзисторної оптопари? Відповідь поясніть.

18. Чи буде відмінність у споживанні потужності від кола керування при безконтактній комутації силових кіл у випадках використання транзисторної та тиристорної оптопар? Відповідь поясніть.

# 3 ОПТОЕЛЕКТРОННІ СХЕМИ ІЗ СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЧАМИ

## 3.1 Схеми ввімкнення світлодіодів

Схемотехніка включення світлодіодів у цифрових (ключових) схемах повинна задовольняти такі основні вимоги:

– максимальна потужність випромінювання сітлодіода;
– глибина модуляції світлового потоку 100%;
– максимальна частота перемикань до 1 ГГц.

На рис. 3.1 зображені варіанти ввімкнення світлодіодів. Дані схеми передбачають використання не форсованих режимів вмикання світлодіодів за струмом.

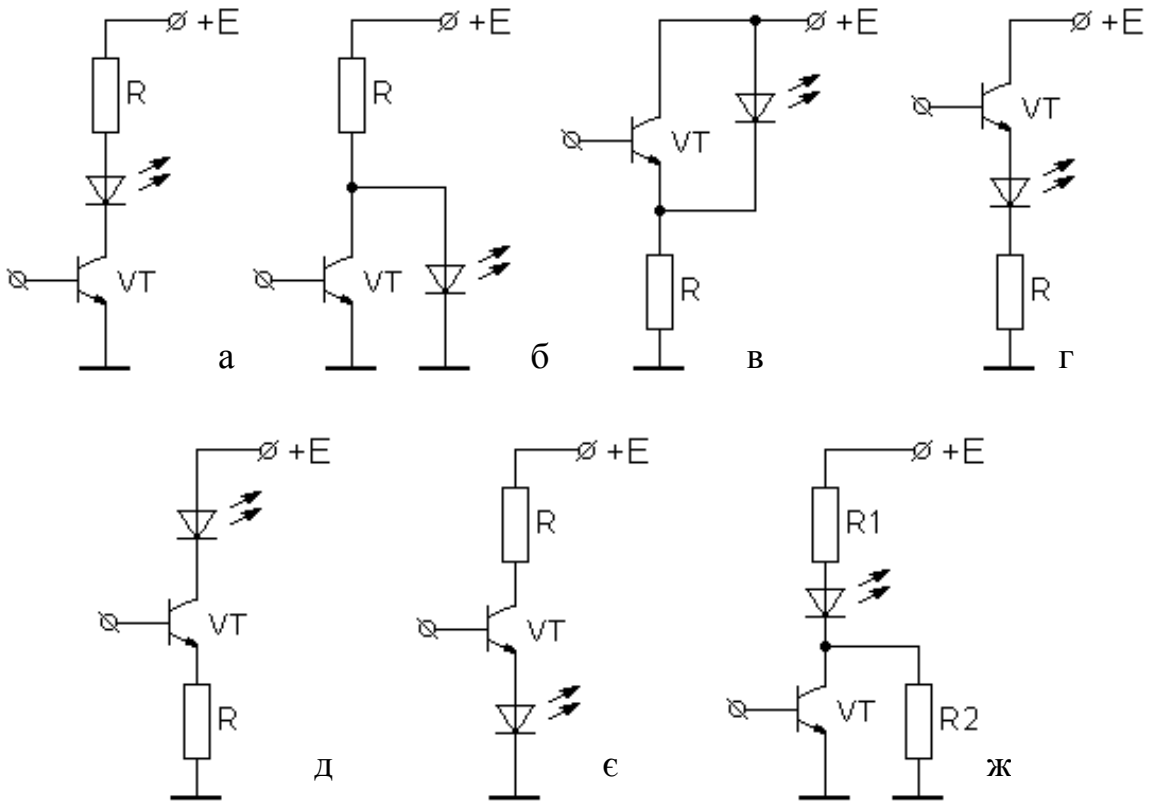



Рисунок 3.1 – Варіанти ввімкнення світлодіодів у вихідних каскадах оптоелектронних логічних елементів

Опір резистора $R$ в схемах на рис. 3.1, а,г,д,є вибирається відповідно до нерівності

$$R \geq \frac{E - U_{КЕ.Н} - U_{СД}}{I_{СД}}, \qquad (3.1)$$

де $E$ – напруга живлення;

$U_{КЕ.Н}$ – напруга між колектором та емітером насиченого транзистора;

$U_{СД}$ – прямий спад напруги на світлодіоді;

$I_{СД}$ – прямий струм через світлодіод.

В схемах на рис. 3.1, б, в опір резистора $R$ повинен задовольняти дві нерівності:

$$\begin{cases} R \geq \dfrac{E - U_{СД}}{I_{СД}} \\ R > \dfrac{E - U_{КЕ.Н}}{I_{К.Н}} \end{cases}, \qquad (3.2)$$

де $I_{К.Н}$ – колекторний струм насиченого транзистора.

Порівнюючи нерівність (3.1) та систему (3.2) можна зробити висновок, що до схем на рис. 3.1, б,в висуваються більш жорсткі вимоги у порівнянні зі схемами на рис. 3.1 а,г,д,є. Напруга $U_{КЕ.Н}$ повинна бути меншою за напругу збудження світлодіода, а струм $I_{К.Н}$, повинен перевищувати $I_{СД}$ для того, щоб виконувалася нерівність $U_{КЕ.Н} < U_{СД}$ . Крім того, споживана схемами на рис. 3.1 а,г,д,є середня потужність $P_{СР1} = \dfrac{P^1}{2} = \dfrac{EI_{СД}}{2}$, у той час як середня потужність, споживана схемами на 3.1, б,в $P_{СР2} = \dfrac{P^1 + P^0}{2} = \dfrac{E(I_{СД} + I_{К.Н})}{2}$, а з огляду на те, що $I_{К.Н} > I_{СД}$, одержимо $P_{СР2} > EI_{СД}$ .

Таким чином, при одних і тих же робочих режимах світлодіода середнє споживання потужності схемами на рис. 3.1, б,в перевищує більше ніж у 2 рази енергоспоживання схемами на рис. 3.1, а,г,д,є.

У схемах на рис. 3.1, а,б рівень напруги відмикання транзистора $U_{ВХ}$ визначається контактною різницею потенціалів переходу база-емітер $U_К$ , тоді як для відмикання транзистора в схемі на рис. 3.1 в треба прикласти напругу $U_{ВХ} > |E_п - U_{CD}| + U_К$. Для збудження світлодіода у схемі рис. 3.1 г на

її вхід треба подати напругу $U_{ВХ} > U_{СД} + I_{СД0} \cdot R_1$, де $I_{СД0}$ – струм, при якому світлодіод починає випромінювати.

При неправильно вибраному резисторі в схемі на рис. 3.1, в глибина модуляції світлового потоку не досягає 100%. У схемі на рис. 3.1, а існує зона нечутливості, яка призводить до затримки фронту. Цей недолік усувається резистором $R_2$ в схемі на рис. 3.1, ж, опір якого визначається, виходячи із заданого початкового струму світлодіода

$$I^0{}_{СД} - R_2 = \frac{E - U^0{}_{СД} - R_1 \cdot I^0{}_{СД}}{I^0{}_{СД}},$$

де $U^0{}_{СД}$ - напруга на світлодіоді при початковому струмі $I^0{}_{СД}$.

Резистор $R_1$ вибирають з умови (3.1). У цьому випадку ємність випромінювального діода підзаряджається, отже, зменшується час вмикання схеми. Крім того, після закривання транзистора, ємність світлодіода розряджається не через закритий транзистор, як у схемі на рис. 3.1, а, а через резистор $R_2$, який має значно менший опір. У результаті істотно зменшується час розряду ємності діода.

Схеми на рис. 3.1, г-є мають ті ж недоліки щодо відношення роботи світлодіода, що і схема на рис. 3.1, а. На відміну від описаних схем в схемах, які зображені на рис. 3.1, б,в, сигнал на світлодіоді змінюється противофазно вхідному сигналу (схема виконує функцію інверсії за світловим потоком щодо входу). Крім того, для цих схем початковий струм крізь світлодіод, відрізняється від нуля, тому зони нечутливості в цих схемах немає.

Особливість схем на рис. 3.1, г,є - високий вхідний опір (транзистор ввімкнений за схемою емітерного повторювача).

Можливий випадок, коли потужності випромінювання одного світлодіода недостатньо, тому необхідно використовувати кілька світлодіодів, що працюють синфазно. Тут можливі два способи: кілька світлодіодів вмикаються або послідовно або паралельно. В обох випадах потужність випромінювання зростає у $n$ разів ($n$ – кількість використовуваних світлодіодів). Проте, при послідовному ввімкненні

швидкодія схеми зменшується, оскільки у цьому випадку зростає постійна часу схеми. Крім того, при великому $n$ необхідно підвищувати значення напруги живлення.

При паралельному вмиканні підвищувати напругу живлення не треба, проте, треба вибирати більш потужний транзистор, оскільки через нього повинен протікати сумарний струм світлодіодів: $I_T = n \cdot I_{СД}$, де $I_T$ – колекторний або емітерний струм транзистора; $I_{СД}$ – струм світлодіода.

При необхідності мати на виході прямий і інверсний світлові потоки використовується схема, зображена на рис. 3.2.

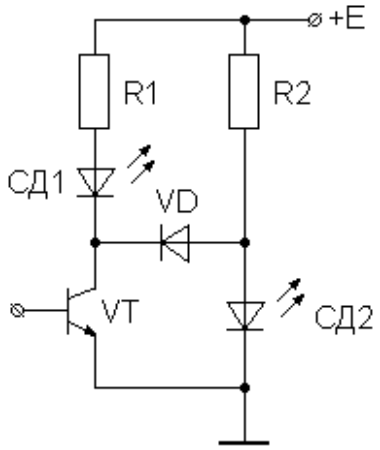



Рисунок 3.2 – Схема з прямим та інверсним оптичними виходами

При подачі на вхід схеми напруги високого рівня транзистор відкривається. Струм через резистор $R_2$ збільшується, а потенціал колектора зменшується. При виконанні умови $I_{СДПОР} R_6 + U_{СД1} = E - U_{КЕ}$, де $I_{СДПОР} \le I_{СД1}$ граничне значення струму світлодіода СД1, світлодіод СД1 засвічується – збуджується прямий оптичний вихід.

Якщо на вхід схеми подана напруга близька до нуля, транзистор закривається, струм через резистори R1 і R2 зменшується. У результаті потенціал колектора підвищується, діод VD закривається. Внаслідок цього світлодіод СД1 гаситься, а світлодіод СД2 засвічується. Оптичний сигнал з’являється на інверсному оптичному виході.

Значення опорів резисторів визначаються із системи рівнянь

$$\begin{cases} R1 \geq \dfrac{E - U_{СД1} - U_{КЕ.Н}}{I_{СД1}} \\ R2 \geq \dfrac{E - U_{СД2}}{I_{СД2}} \\ I_{K\max} \geq I_{СД} + \dfrac{E - U_{КЕ.Н} - U_{Д}}{R2} \end{cases},$$

де $U_{СД1}$, $U_{СД2}$ – напруги, при яких починає випромінювати відповідно перший та другий світлодіоди;

$U_{КЕ.Н}$ – напруга насичення транзистора;

$I_{СД1}$, $I_{СД2}$ – струм відповідно першого і другого світлодіода;

$U_{Д}$ – прямий спад напруги на діоді;

$I_{K\max}$ – максимально допустимий колекторний струм транзистора.

Дана схема дозволяє працювати з напругою живлення > 2В. Можливо також використання даної схеми без діода VD, тоді напруга живлення обмежується за значенням і складає не більше подвоєної напруги збудження світлодіода.

### 3.2 Схеми оптичної передачі даних

Пристрої оптичної передачі даних призначаються для перетворення електричних сигналів в оптичні та подальшої передачі їх у лінію зв'язку. Виходячи зі свого функціонального призначення, подібний пристрій має електричний вхід та оптичний вихід, параметри яких повинні бути узгодженими з джерелом електричних сигналів, з одного боку, і з джерелом випромінювання та оптичною лінією зв'язку, з другого.

В основі пристрою оптичної передачі лежить джерело оптичного випромінювання (звичайно це світлодіод або напівпровідниковий лазер), в якому безпосередньо здійснюється перетворення електричного сигналу в оптичний. За порівнянням з лазерами світлодіоди відрізняються великим строком служби, меншою чутливістю до деградації, більш слабкою температурною залежністю потужності випромінювання, нижчою вартістю та простішою експлуатацією. Проте вони програють лазерам за такими параметрами як ширина спектра випромінювання, ефективність введення

випромінювання у волокно, вихідна потужність випромінювання та швидкодія.

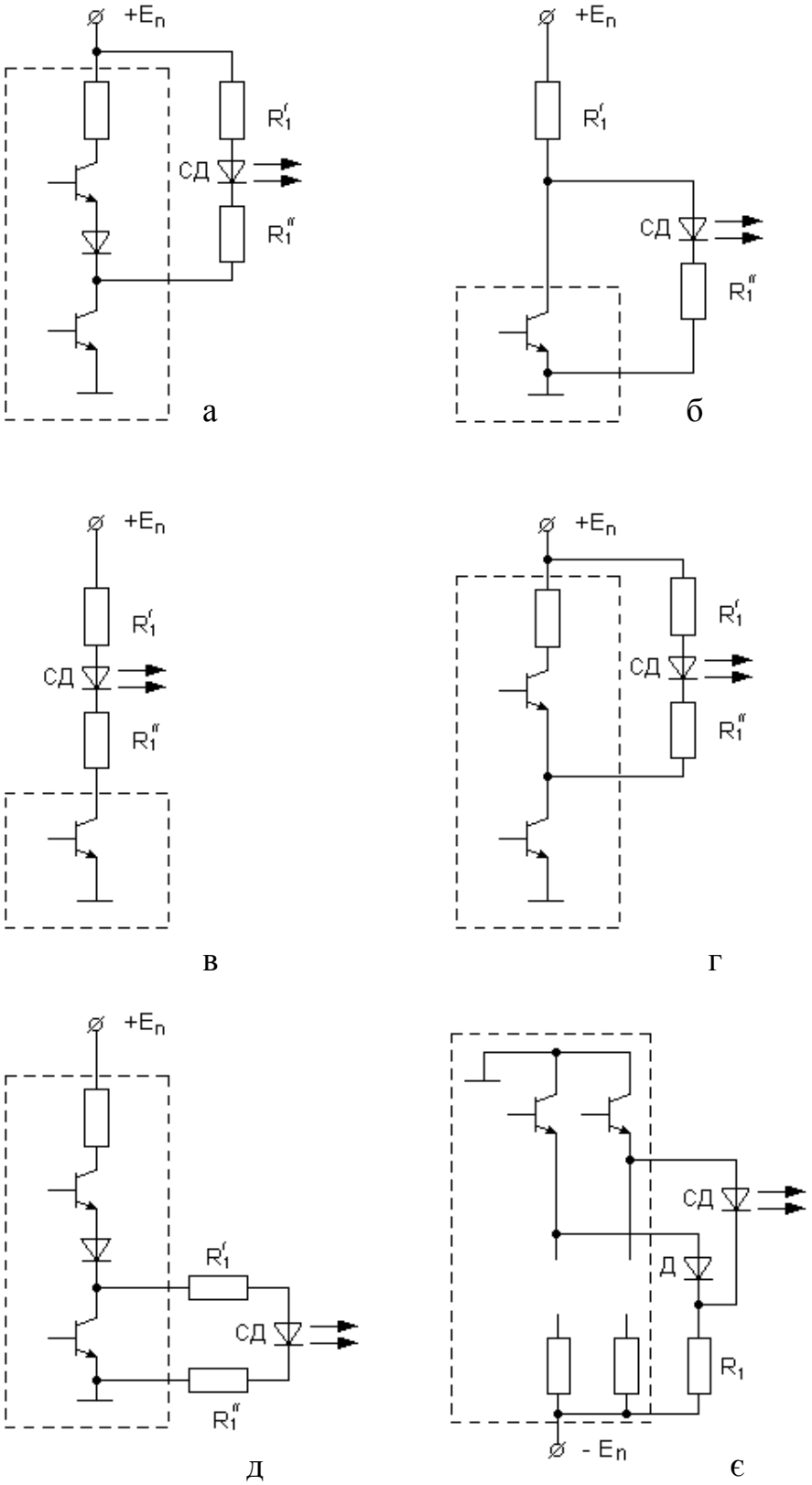



Рисунок 3.3 – Схеми можливого підключення світлодіодів до виходів стандартних інтегральних схем

Крім джерела оптичного випромінювання оптичний передавач повинен містити електричну схему (підсилювач, кодер, модулятор, формувач), яка керує джерелом оптичного випромінювання і узгоджує його вхідні електричні параметри з вихідними параметрами електронної схеми, якою формується електричний сигнал, призначений для передачі.

При розробці електронних схем керування джерелом випромінювання для пристроїв оптичної передачі цифрових сигналів необхідно задовольнити ряд вимог:

– узгодження рівнів вхідних сигналів із ТТЛ і МОН, тобто рівнями інтегральних мікросхем на біполярних і МОН-транзисторах;

– стабільність роботи випромінювальних діодів при впливі різних експлуатаційних факторів (наприклад, підвищеної температури навколишнього середовища);

– швидке вмикання і вимикання випромінювальних діодів при дії сигналів керування;

– підвищення завадостійкості вхідних кіл передавального кінцевого пристрою.

Ці вимоги деякою мірою можуть задовольнити різні логічні мікросхеми. Варіанти підключення світлодіодів до різних типів інтегральних схем зображені на рис. 3.3.

Вихідний опір більшості цифрових мікросхем у стані логічного «0» суттєво відрізняється від вихідного опору в стані логічної «1» і не дозволяє одержати задовільну симетрію выходного каскаду передавального пристрою. Виняток складають ДТЛ-мікросхеми (рис. 3.3, д.). Їх вихідний опір у діапазоні робочих струмів у стані логічного «0» ($R^0_{ВИХ}$) і в стані логічної «1» ($R^1_{ВИХ}$) лежить у межах 10—200 Ом. І якщо дотримується умова

$$R_1^{'} \approx R_1^{''} >> \left( \frac{R^0_{ВИХ} - R^1_{ВИХ}}{2} \right),$$

то вихідний каскад передавального пристрою, побудований на основі такої мікросхеми, можна вважати практично симетричним.

Досягти задовільної симетрії передавального пристрою оптоелектронної лінії зв'язку можна при використанні різних типів мікросхем, але в цьому випадку потрібно деяке ускладнення схеми. Основною причиною перебоїв при передачі сигналів логічного «0» і логічної «1» є відхилення параметрів режиму роботи випромінювального діода через температурний розкид його ВАХ, похибки значення опору резистора навантаження, який вмикається послідовно в коло випромінювального діода. На рис. 3.4 зображена схема типового цифрового передавального пристрою передачі логічних сигналів сумісних з ТТЛ (транзисторно-транзисторна логіка, $U^0$=0.4 В; $U^1$=2.4 В).

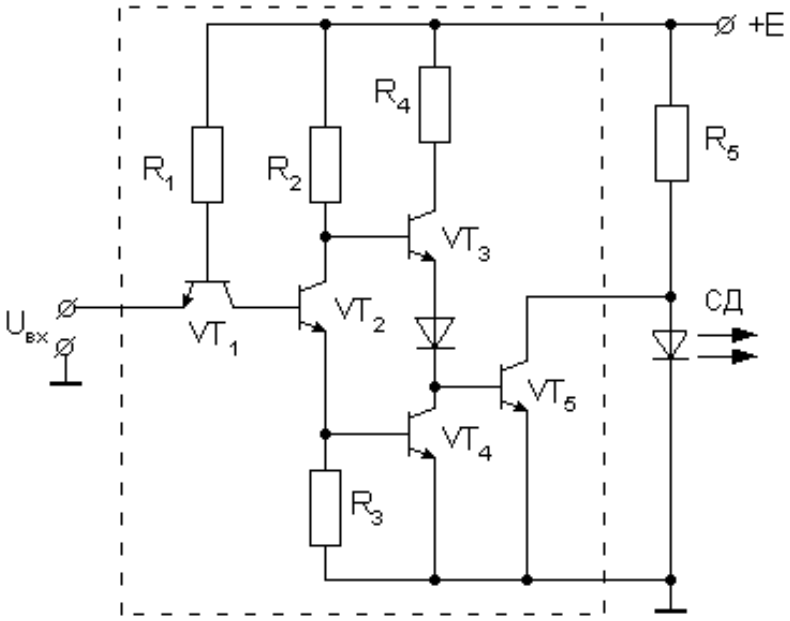



Рисунок 3.4 – Електрична схема цифрового передавального пристрою

Такий пристрій виготовляється в інтегральному виконанні і за своєю структурою є аналогічним до стандартного інвертора ТТЛ (на рис. 3.4 ця частина пристрою обведена пунктиром). Він складається з вхідної частини на транзисторі VT1, фазороздільного каскаду на транзисторі VT2, двотактного підсилювача на транзисторах VT3 та VT4 та вихідного каскаду з відкритим колектором на транзисторі VT5. Оскільки p-n-p транзистор є технологічно невиправдано складним для цифрових інтегральних схем, двотактний вихідний каскад реалізується на транзисторах n-p-n типу і називається квазікомплементарним на відміну

від комплементарного, що складається з пари n-p-n та p-n-p транзисторів. Для почергового вмикання вихідних n-p-n транзисторів VT3 та VT4 використовується проміжний фазороздільний каскад на транзисторі VT2 і резисторах R2 та R3. Цей каскад має два виходи: колекторний та емітерний, імпульси на яких є протифазними. Завдяки цьому зміна потенціалу на базі транзистора VT5 відбувається за рахунок одночасного перемикання транзисторів VT3 та VT4, один з яких закривається, а інший відкривається. Цим досягаються високі швидкості перемикання вихідного транзистора VT5 з відкритого стану у закритий і навпаки.

Зовнішніми компонентами схеми є резистор R5 та світлодіод СД. Оскільки вихідний каскад реалізований за схемою з відкритим колектором, електричний режим роботи світлодіода СД задається резистором *R*5. З урахуванням температурного розкиду вихідних параметрів електронної схеми керування, значення опору резистора *R*5 вибирається із співвідношень

$$R5_{\min} = \frac{U^1_{ВИХ} - U^1_{BX\max}}{I^1_{BX\max}}, \text{ при } t_{\min}$$

$$R5_{\max} = \frac{U^1_{ВИХ} - U^1_{BX\min}}{I^1_{BX\min}}, \text{ при } t_{\max}$$

де $U^1_{ВИХ}$ - вихідна напруга в стані логічної «1» на виході транзистора VT5.

Запас завадостійкості вхідного кола СД визначається граничними рівнями струмів спрацьовування в стані логічного «0» і логічної «1»:

$$\Delta I^0_{ГР} = I^0_{BX\max} - I^1_{BX\min}$$

$$\Delta I^1_{ГР} = I_{BX\max} - I_{BX\min}$$

Для надійного захисту вхідних кіл цифрових передавальних пристроїв від зовнішніх перешкод передавальна характеристика передавального пристрою повинна мати гістерезис, тобто напруги, при яких відбуваються перемикання пристрою з відкритого стану у закритий та із

закритого у відкритий повинні бути різними. При цьому ширина гістерезису (різниця між напругами перемикання) повинна бути більшою за максимальну перешкоду, що спостерігається на фоні сигналу. Типовою схемою, передавальна характеристика якої має гістерезис, є тригер Шмітта.

Тригер Шмітта функціонально являє собою компаратор, рівні вмикання та вимикання якого не збігаються. Можливий варіант передавального пристрою, реалізованого на основі тригера Шмітта, наведений на рисунку рис. 3.5.

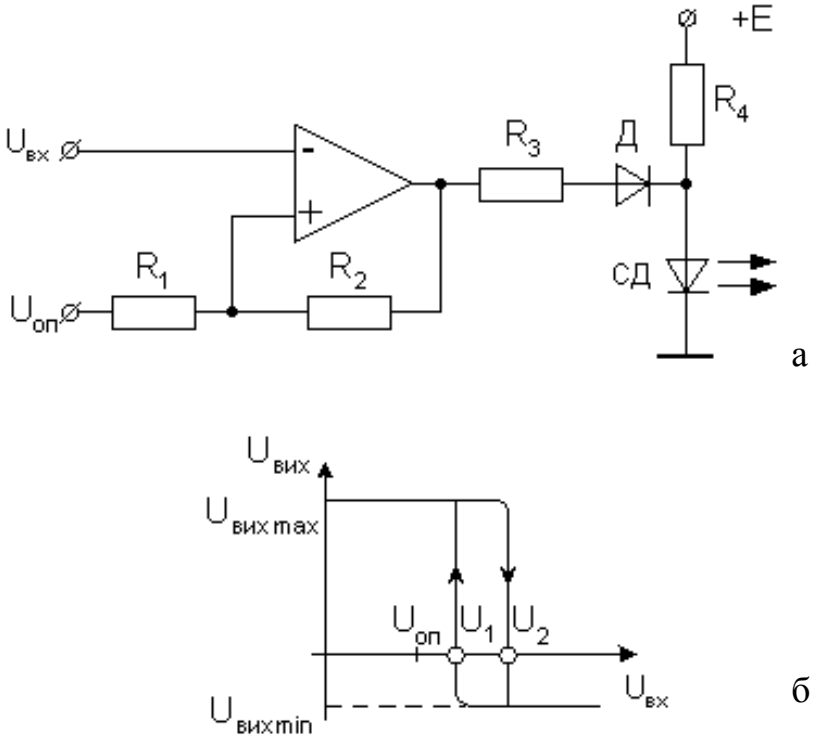



Рисунок 3.5 – Передавальний пристрій із гістерезисом: електрична схема (а) та передавальна характеристика (б)

У зображеній схемі гістерезис перемикання досягається тим, що компаратор охоплюється позитивним зворотним зв'язком через подільник напруги $R1$, $R2$. Нижній $U_1$ та верхній $U_2$ пороги спрацювання схеми залежать від опорів резисторів і визначаються виразами

$$U_2 = U_{ОП} + \frac{U_{ВИХ\max} - U_{ОП}}{1 + R2/R1}, \qquad (3.3)$$

$$U_1 = U_{ОП} + \frac{U_{ВИХ\min} - U_{ОП}}{1 - R2/R1}. \qquad (3.4)$$

З виразів (3.3) та (3.4) можна знайти ширину гістерезиса:

$$U_r = U_2 - U_1 = \frac{U_{ВИХ\max} - U_{ВИХ\min}}{1 + R2/R1}. \qquad (3.5)$$

З виразів (3.3) - (3.5) видно, що, змінюючи $U_{ОП}$ та відношення $R2/R1$, можна регулювати положення верхньої і нижньої точок перемикання $U_1$ і $U_2$ у широкому діапазоні як негативних, так і позитивних значень.

Одним із схемотехнічних шляхів зниження часу затримки вмикання є спосіб форсованого заряду бар'єрної ємності світлодіода, наприклад, завдяки використанню форсувального *RC*-кола в колі передавального пристрою (рис. 3.6).

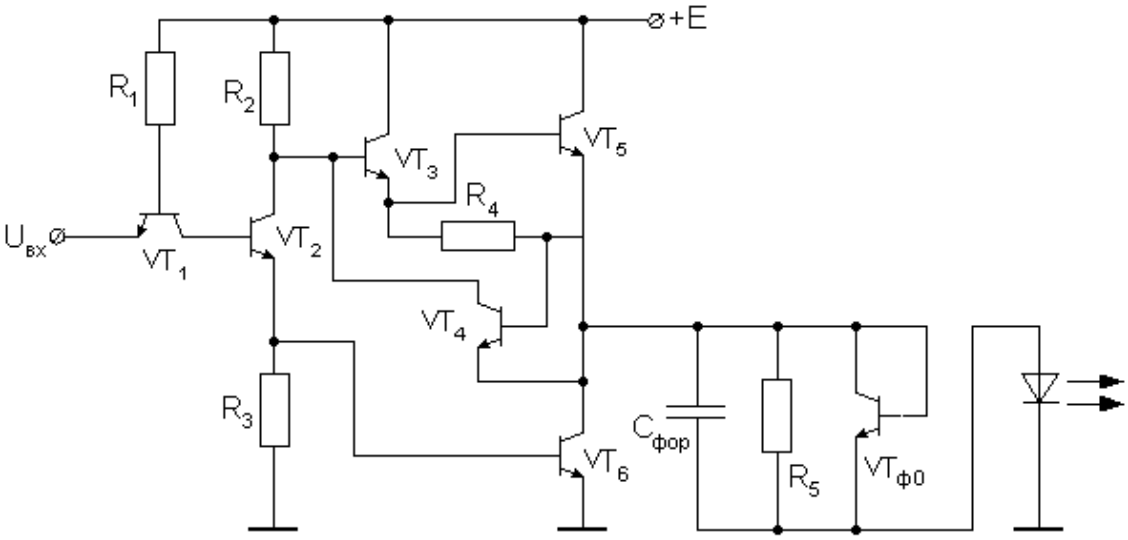



Рисунок 3.6 – Предавальний пристрій з форсованим ввімкненням світлодіода

Струмозадавальний резистор *R5* вибирається з умови забезпечення номінального вхідного струму:

$$R5 = \frac{U^1_{ВИХ} - U_{ВХ}}{I_{ВХ}},$$

де $U_{ВИХ}$ – вихідна напруга в стані логічної «1»;

$U_{ВХ}$ – вхідна напруга; $I_{ВХ}$ – вхідний струм.

Ємність форсувального конденсатора $C_{ФОР}$ вибирається з умови

$$C_{фор} \geq \begin{cases} C_{BX} \dfrac{U_{BX}}{U'_{BИX} - U_{BX}} \\ I_{BX} \dfrac{t_{3BM}}{U'_{BИX} - U_{BX}} \end{cases},$$

де $t_{3\,BM}$ – необхідний час затримки вмикання;

$C_{BX}$ – вхідна ємність світлодіода.

Іншим способом зменшення часу затримки вмикання є спосіб попереднього заряду бар'єрної ємності світлодіода до значення, близького до граничної напруги його вмикання (рис. 3.7).

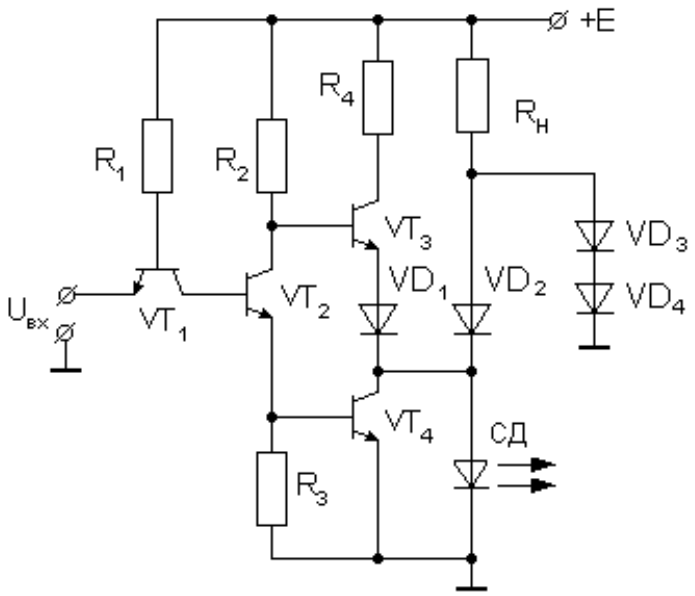



Рисунок 3.7 – Передавальний пристрій з попереднім зарядом бар'єрної ємності світлодіода

Завдяки використанню діодів VD3 та VD4 напруга на світлодіоді не може бути меншою, за спад напруги на прямо зміщеному діоді VD4. У результаті бар'єрна ємність світлодіода навіть при насиченому транзисторі VT4 залишається зарядженою до напруги, близької до напруги вмикання світлодіода (це задовольняється відповідним вибором діодів VD1 - VD4). Внаслідок цього при замиканні вихідного транзистора VT4 вмикання світлодіода відбувається скоріше, ніж без діодів.

Враховуючи те, що світлодіоди з точки зору способу збудження генерації випромінювання мало чим відрізняються від напівпровідникових

лазерних діодів, розглянуті вище схеми оптичної передачі даних можуть бути у тому чи іншому ступені пристосовані для керування інжекційними лазерами. Проте, для того, щоб повною мірою реалізувати усі переваги, які надає використання джерел когерентного випромінювання, необхідно враховувати певні особливості останніх. Як було зазначено вище, інжекційні лазерні діоди, на відміну від світлодіодів, мають значну залежність потужності генерованого випромінювання від температури. Крім того, перехід в активний режим відбувається з певною затримкою, значення якої може виявитися занадто великим в деяких практичних застосуваннях.

Температурна стабілізації потужності оптичного випромінювання напівпровідникового лазерного діода може бути досягнута кількома схемотехнічними рішеннями. Основними з них є такі, що забезпечують збільшення струму накачки лазерного діода при підвищенні температури. Завдяки цьому зменшення потужності оптичного випромінювання, пов'язане з підвищенням температури, буде компенсуватися її збільшенням за рахунок зростання прямого струму лазерного діода. Досягти зазначеного ефекту можливо, наприклад, при вмиканні фотоприймача у коло зворотного зв'язку підсилювального каскаду, що керує лазерним діодом. При цьому способі частина випромінювання лазерного діода спрямовується на фотоприймач. Зниження потужності вихідного оптичного сигналу буде призводити до зменшення значення вихідного електричного параметра фотоприймача. Через коло зворотного зв'язку це зменшення надходить на вхід підсилювального каскаду, викликаючи збільшення його вихідного струму. Перевагою такого рішення є те, що інформативним параметром, на підставі якого виробляється керуючий вплив, є потужність випромінювання лазерного діода, чим досягається висока ефективність стабілізації. Основний недолік – використання додаткових елементів для розділення вихідного оптичного сигналу.

В іншому способі, схемотехнічна реалізація якого наведена на рисунку 3.8, стабілізація вихідної оптичної потужності досягається за рахунок використання кремнієвих діодів, що вмикаються у вхідне коло підсилювального каскаду, який керує інжекційним лазером.

У цій схемі лазерний діод VD2 живиться від генератора струму накачки, реалізованого на транзисторі VT2. Значення струму цього генератора змінюється в залежності від температури. Це досягається введенням у базове коло транзистора VT2 ланцюга, що складається з кремнієвих діодів VD3…VD5 і резистора R4. Струм через цей ланцюг вибирається таким, щоб робоча точка діодів знаходилася на лінійній ділянці їх вольт-амперної характеристики. Струм колектора транзистора VT2, який є струмом накачки лазерного діода, визначається значенням напруги на резисторі R4 та значенням опору резистора R3.

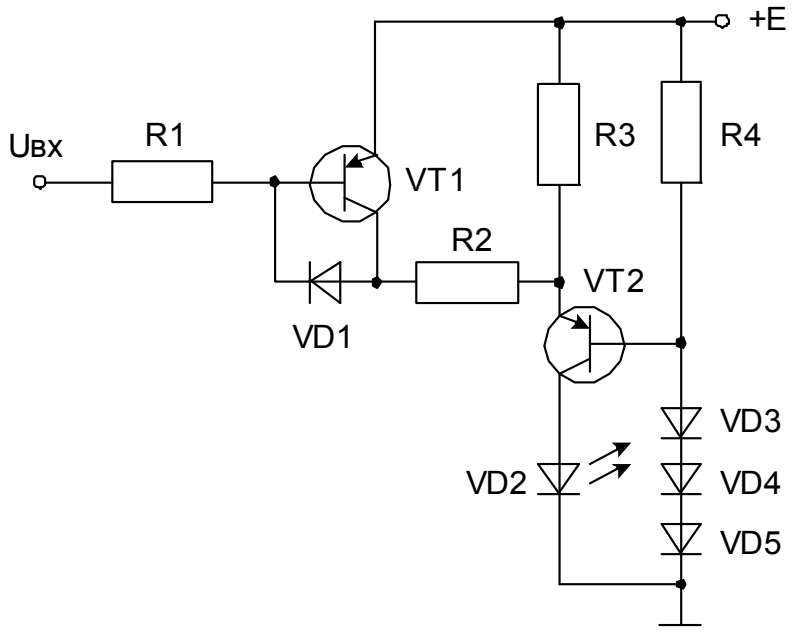



Рисунок 3.8 – Схема керування напівпровідниковим інжекційним лазером

При зміні температури відбувається перерозподіл напруги між діодами VD3…VD5 та резистором R4. Підвищення температури викликає зменшення напруги на діодах і збільшення напруги на резисторі. У результаті транзистор VT2 відкривається сильніше. Його колекторний струм, який є струмом накачки лазера, зростає і підтримує потужність оптичного випромінювання лазера на попередньому рівні.

Ступінь залежності колекторного струму транзистора VT2 (струму накачки лазерного діода) від температури визначається кількістю використовуваних діодів VD3…VD5. При правильному виборі кількості

діодів вдається досягти майже повної стабільності у значеннях потужності при коливаннях температури.

Для керування інжекційним лазером сигнал з попереднього каскаду подається через резистор R1 на базу транзистора VT1. При високому рівні цього сигналу (близькому до +E) транзистори VT1 та VT2 є закритими і діод не випромінює.

При зменшенні напруги $U_{вх}$ транзистор VT1 відкривається. Якщо при цьому опір у ланцюгу відкритий транзистор VT1 - резистор R2 буде меншим за опір резистора R3, емітерний, а значить і колекторний струм транзистора VT2 зросте і діод VD2 перейде в активний режим.

Діод VD1 прискорює процес перемикання транзистора VT1 з відкритого стану у закритий, що зменшує тривалість заднього фронту формованого сигналу. Цей діод підбирається так, щоб прямий спад напруги на ньому був меншим, ніж прямий спад напруги на колекторному переході транзистора VT1. У результаті насичення транзистора VT1 буде неповним. У відкритому стані він буде знаходитися на межі активної області та області насичення. Завдяки цьому знижується накопичення зарядів у базі транзистора і, як наслідок, прискорюється їх розсмоктування при перемиканні транзистора у закритий стан.

При певному співвідношенні опорів резисторів R3 та R4 можна досягти того, що у неактивному режимі транзистор VT2 буде закритий не повністю і його колекторний струм буде трохи меншим, за пороговий струм лазерного діода. Це забезпечить значне зменшення часу переходу лазера в режим генерації випромінювання.

Основним недоліком розглянутого способу термокомпенсації потужності лазерного випромінювання є те, що він слабо враховує зменшення потужності за рахунок власного розігрівання кристала діода. При розміщенні діодів, що входять до кола термокомпенсації, поблизу лазерного діода цей недолік значною мірою може бути усунений.

**Контрольні питання**

1. Проаналізуйте основні схеми ввімкнення світлодіодів. Як

визначається опір обмежуючого резистора в кожній з цих схем?

2. Проаналізуйте схему з прямим та інверсним оптичними виходами.

3. Охарактеризуйте призначення та проаналізуйте варіанти схемотехнічної реалізації схем оптичної передачі даних.

4. Проаналізуйте схемотехнічні методи зменшення часу затримки вмикання/вимикання світлодіодів.

5. У чому полягають особливості схемотехнічного використання напівпровідникових інжекційних лазерів? Як вони враховуються?

6. Аналізуючи спосіб температурної стабілізації оптичної потужності лазерного діода за допомогою звичайних діодів, запропонуйте схемотехнічне рішення температурної стабілізації за допомогою фотодіода.

7. Якими схемотехнічними методами можуть бути покращені параметри швидкодії пристрою керування лазерним діодом?

# 4 ОПТОЕЛЕКТРОННІ СХЕМИ З ФОТОПРИЙМАЧАМИ

Оптоелектронні пристрої, в яких використовуються фотоприймачі, призначаються для формування електричного сигналу із заданими параметрами відповідно до заданого керуючого впливу, що поданий оптичним сигналом.

Фотоприймальний пристрій (фотодетектор або оптоелектронний перетворювач) має оптичний вхід та електричний вихід, параметри яких повинні бути узгодженими з джерелом випромінювання та оптичною лінією зв'язку, з одного боку, та з електричним навантаженням, з іншого.

В основі фотоприймального пристрою лежить фотоприймач, в якому безпосередньо здійснюється перетворення оптичного сигналу в електричний. Для того, щоб вихідний сигнал фотоприймача набув вигляду, придатного для його подальшого використання як вимірювальний, інформаційний або керуючий сигнал, фотоприймальний пристрій повинен містити будь-який перетворювач електричних сигналів: підсилювач, декодер, формувач та ін.

У цьому розділі розглянемо основні схемотехнічні методи реєстрації та попередньої обробки оптичних сигналів, основані на використанні напівпровідникових дискретних фотоприймачів: фоторезисторів, фотодіодів та фототранзисторів.

## 4.1 Схеми на основі фоторезисторів

Основними схемами вмикання фоторезисторів є: схема, що являє собою послідовне з'єднання фотоприймача та опору навантаження, мостова та диференціальна схеми (рис. 4.1). Останні дві, як правило, використовуються за наявності двох фоторезисторів, один з яких є робочим, а другий служить для порівняння та вмикання в опорний оптичний канал пристрою. Наведені схеми дозволяють вимірювати інтенсивність оптичного випромінювання. У найпростішому випадку вимірювальний прилад безпосередньо вмикається в коло подільника напруги, мостової або диференціальної схем.

За допомогою змінних резисторів R1 регулюють чутливість приладу до потужності оптичного випромінювання відповідно до діапазону зміни контрольованого світлового потоку. Резисторами R2 мостової та диференціальної схем здійснюють початкове встановлення струму плечей

при одночасному освітленні робочого та допоміжного фотоприймачів однаковими світловими потоками. Балансування необхідне внаслідок розкиду параметрів фоторезисторів. За допомогою таких приладів можна не лише виміряти рівень освітленість, але й зафіксувати знак її відхилення від деякого опорного значення.

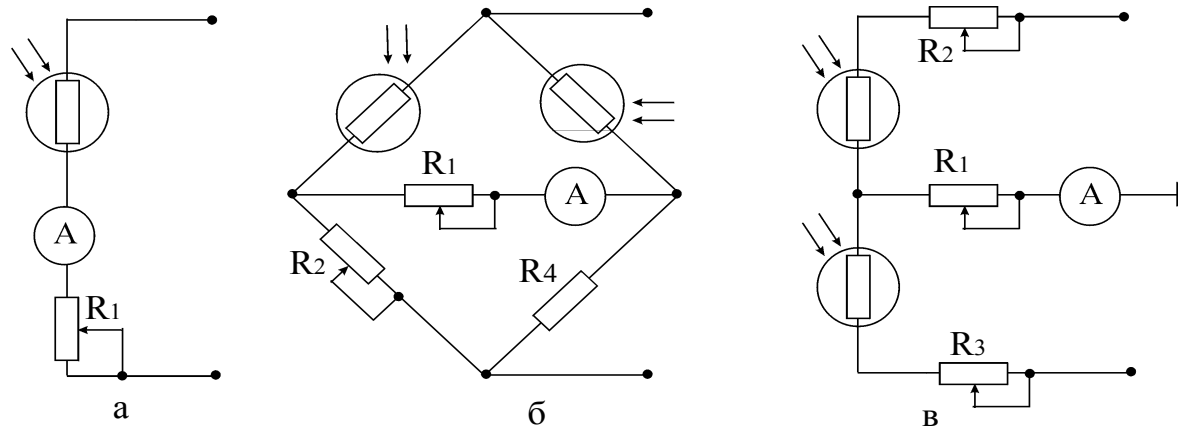



Рисунок 4.1 – Схеми ввімкнення фоторезисторів:
а – потенціометрична; б – мостова; в - диференціальна

В розглянутих схемах ввімкнення вимірювального приладу (у даному випадку амперметра) можна замінити пороговими або підсилювальними елементами. Такими приладами можуть бути електромагнітні реле, реле на магнітокерованих контактах, магнітні підсилювачі, транзистори, тиристори, операційні підсилювачі. Найбільш ефективними серед них та такими, що знаходять найбільш поширене застосування, є напівпровідникові прилади, що можуть виконувати як функції комутації, так і функції підсумовування.

З появою операційних підсилювачів значною мірою усунуті такі традиційні недоліки напівпровідникових приладів як температурна нестабільність та розкид параметрів. Похибка передання сигналу операційним підсилювачем у першу чергу залежить від елементів, увімкнених у вхідні кола та коло зворотного зв’язку підсилювача, і меншою мірою від власних параметрів підсилювача (напруги зміщення нуля, різниці вхідних струмів, величини та нестабільності коефіцієнта підсилення, вхідного опору).

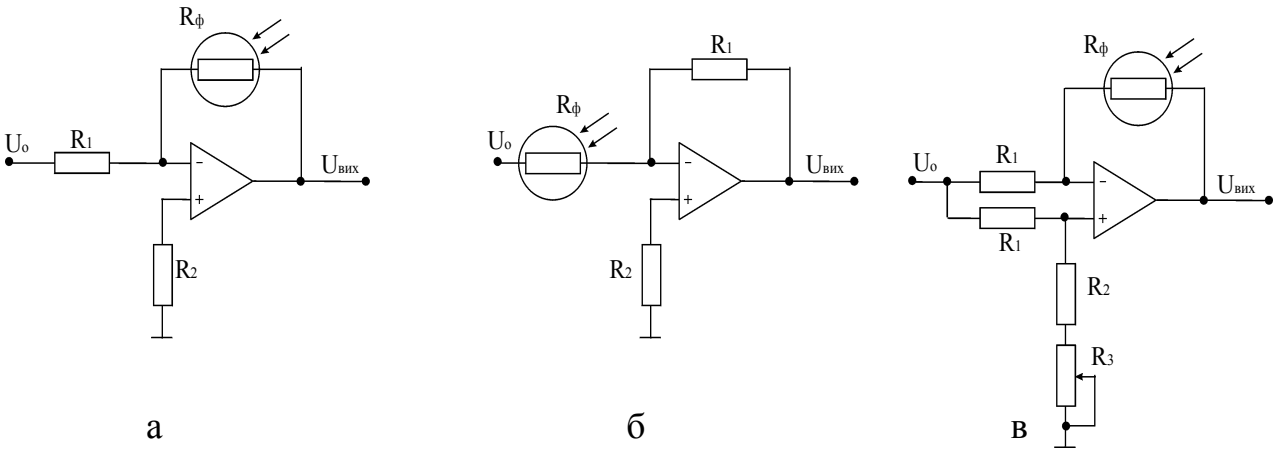



Рисунок 4.2 – Схеми ввімкнення фоторезисторів в кола операційних фоторезисторів: а, б – потенціометричні; в - мостова

Основні схеми ввімкнення фоторезисторів в кола операційних підсилювачів наведені на рис. 4.2.

В схемі (рис. 4.2, а) операційний підсилювач перетворює опір фоторезистора у напругу. Функція перетворення визначається виразом:

$$U_{вих} = -\frac{R_ф}{R1} U_0 \qquad (4.1)$$

При незмінних умовах експлуатації через лінійність вольт-амперної характеристики опір фотоприймача залежить лише від рівня освітленості. З ростом інтенсивності оптичного випромінювання опір фоторезистора зменшується, а значить, відповідно до виразу (4.1), і вихідна напруга. Залежність вихідної напруги від освітленості повторює люкс-омічну характеристику фоторезистора, що описує залежність опору фоторезистора від рівня освітленості. Якщо поміняти місцями резистор R1 і фоторезистор (рис. 4.2, б), то вихідний сигнал буде змінюватися відповідно до формули

$$U_{вих} = -\frac{R1}{R_ф} U_0 ,$$

тобто, повторювати енергетичну характеристику.

У мостовій схемі (рис. 4.2, в) вихідна напруга визначається з виразу

$$U_{вих} = \frac{R_{ф_0} - R_ф}{R1 + R_{ф_0}}. \qquad (4.2)$$

Значення резисторів R1 необхідно вибирати таким, яке дорівнює опору $R_{Фо}$ фоторезистора у темновому режимі або при рівні освітленості, що приймається за відліковий. Однак, внаслідок розкиду параметрів фоторезисторів, зумовленого неточністю підбору та деградацією, значення $R_{Фо}$ і R1, як правило, дещо відрізняються. Схема є збалансованою ($U_{вих}$=0), якщо $R_{Фо}$=R2+R3. Для цього на неінвертуючий вхід операційного підсилювача послідовно з $R_2$ вмикається змінний резистор $R_3$, за допомогою якого відбувається початкове встановлення схеми.

У мостовій схемі вихідний сигнал пропорційний лише зміні опору фоторезистора і не залежить від його абсолютної величини. Вираз (4.2) можна записати у вигляді

$$U_{вих} = \frac{\Delta R_ф}{R1 + R_{ф_0}} U_0 ,$$

де $\Delta R_Ф$ - зміна опору фоторезистора відносно відлікового значення $R_Ф$.

Знак плюс береться, якщо за $R_Ф$ приймається темновий опір фоторезистора $R_T$ або значення, що відповідає мінімальній освітленості; знак мінус - при рівності $R_Ф$ найменшому опору фоторезистора в робочому діапазоні.

Розглянута мостова схема містить один фоторезистор, але з метою компенсації дестабілізуючих зовнішніх впливів резистори R2 та R3 можна замінити іншим фоторезистором з параметрами, якомога ближчими до першого.

Основними недоліками фоторезисторів є значна інерційність, нелінійність люкс-амперної характеристики, залежність опору від температури. Вказані недоліки значною мірою усуваються за допомогою коректуючих перетворювачів. Проте їх використання не завжди виправдане. Наприклад, у більшості випадків недоцільно коректувати динамічні

характеристики фоторезисторів, оскільки простіше використати інший тип фотоприймача з потрібною швидкодією.

### 4.2 Схеми на основі фотодіодів

Як було зазначено у пункті 2.2.4, фотодіоди можуть працювати у двох режимах: фотодіодному та вентильному. При цьому треба зазначити, що у фотодіодному режимі фотодіод має більшу інтегральну чутливість, а у вентильному – мінімальний темновий струм, а значить, підвищену температурну стабільність.

Фотодіоди ефективно використовуються для приймання модульованого випромінювання як з фоновим засвічуванням, так і без нього. На рис. 4.3 наведені основні схеми ввімкнення фотодіодів у підсилювальні каскади на біполярних транзисторах *n-p-n* та *p-n-p* типу. В розглядуваних схемах струм фотодіода поділяється на дві складові, одна з яких утворює базовий струм транзистора, а інша – струм, що тече через резистор R1. Значення обох складових залежить від рівня освітленості фотодіода, а співвідношення між ними – від опору резистора R1.

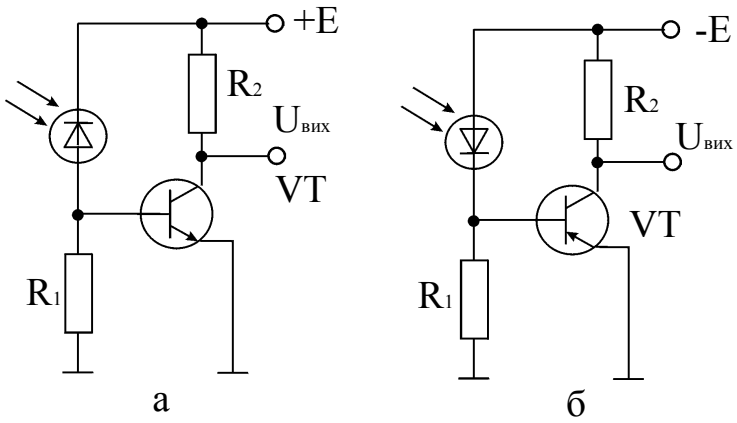



Рисунок 4.3 – Схеми включення фотодіодів у підсилювальні каскади на біполярних транзисторах

При відсутності оптичного випромінювання струм, що тече через фотодіод, дорівнює темновому струму. У результаті, транзистор є закритим, і напруга на виході підсилювального каскаду дорівнює нулю. При дії оптичного випромінювання зворотний струм фотодіода зростає. Транзистор

відкривається, і вихідна напруга наближається за значенням до напруги живлення Е.

Чутливість схеми пропорційна опору резистора R1. Чим більший опір, тим більша та складова струму фотодіода, яка створює базовий струм транзистора. Тому відкривання транзистора настає при менших значеннях інтенсивності світлового випромінювання. Проте зі збільшенням опору зростає постійна часу заряду та розряду ємності фотодіода. У зв'язку з цим максимальне значення опору резистора R1 обмежується ємністю *p-n*-переходу і визначається вимогами до швидкодії пристрою.

Щоб вхідний опір активного елемента (фотодіода) не шунтував опір навантаження фотоприймального пристрою, який може бути досить високим, у схемі узгодження використовують польові транзистори. На рисунку 4.4, а наведений приклад можливого використання фотодіода у фотодіодному режимі в схемі з польовим транзистором. Оскільки в схемі використовується польовий транзистор, що працює в режимі збіднення (нормально відкритий польовий транзистор), робочими напругами є напруги, при яких напруга затвор-виток є негативною. Виконання цієї умови забезпечується резистором R3.

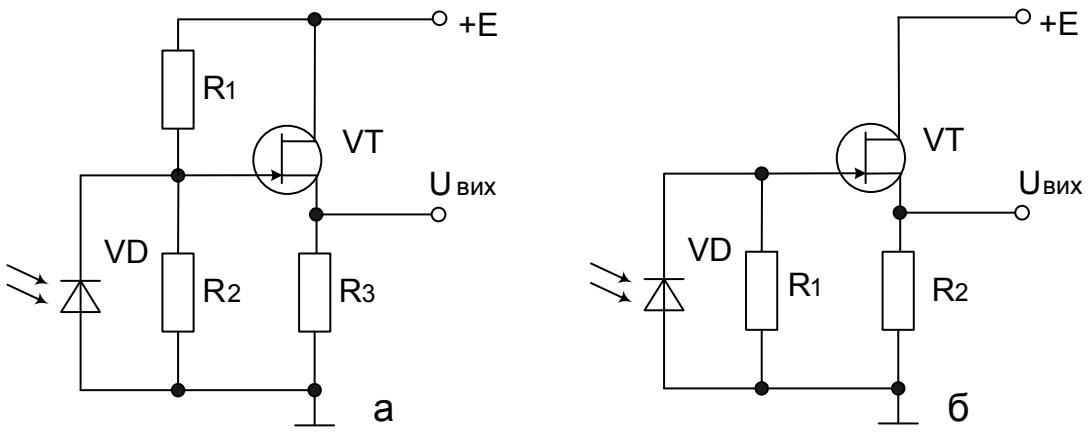



Рисунок 4.4 – Схеми ввімкнення фотодіодів у підсилювальні каскади на польових транзисторах

При відсутності випромінювання напруга на резисторі R2 є меншою за напругу на резисторі R3. У результаті потенціал затвора є меншим за потенціал витоку. Транзистор є закритим, і вихідна напруга є близькою до

нуля. При освітленні фотодіода його струм зростає. Спад напруги на резисторі R1 збільшується. Це обумовлює зменшення абсолютного значення потенціалу затвора, і, як наслідок, зменшення різниці потенціалів між затвором та витоком. У результаті струм, який тече через транзистор, збільшується, що призводить до збільшення і вихідної напруги.

В схемі на рис. 4.4, б фотодіод увімкнено у вентильному режимі. При значенні опору резистора R1 порядка 1 МОм напруга на фотодіоді дорівнює напрузі фотоЕРС (напрузі холостого ходу). Перевагою використання вентильного режиму роботи фотодіода є логарифмічна залежність вихідної напруги від фотоструму, що дозволяє при змінах фотоструму на два порядки отримати зміну фотоЕРС лише на 20-30 відсотків. У результаті, схема фотоприймального пристрою є нечутливою до розкиду параметрів використовуваних елементів та характеризується підвищеною стійкістю до впливу зовнішніх факторів, зокрема температури. Проте при використанні вентильного режиму мають місце значні спотворення тієї частини сигналу, якій відповідають великі значення інтенсивності оптичного випромінювання (логарифмічна функція є нелінійною та такою, що швидко уповільнює зростання при великих значеннях аргументу). Крім того вентильний режим характеризується підвищеною тривалістю перехідних процесів, які мають місце при вимиканні випромінювання. Це пов’язано з повільним розсмоктуванням надлишкових фотоносіїв заряду у фотодіоді. Для прискорення цього процесу опір резистора R1 повинен бути зменшений, але при цьому чутливість пристрою також зменшується.

Розглянуті схеми є достатньо простими і можуть бути використані у тих випадках, коли не висуваються будь-які особливі вимоги до чутливості та швидкодії. Для тих схем, в яких параметри швидкодії, чутливості, лінійності передаточної функції повинні задовольняти певні вимоги, зазвичай використовують ввімкнення фотодіодів у кола операційних підсилювачів. Найбільш типові варіанти такого ввімкнення наведені на рисунку 4.5.

На рисунку 4.5, а зображена схема, в якій фотодіод використовується у фотодіодному режимі. В цій схемі операційний підсилювач працює як

перетворювач струм-напруга, і тому напруга на його виході є пропорційною струму фотодіода $I_Ф$:

$$U_{ВИХ} = I_Ф \cdot R1,$$

Змінюючи опір резистора $R1$ можна отримати необхідний рівень вихідного сигналу практично для будь-якого значення вхідного оптичного сигналу. Схема характеризується високою чутливістю та малим вхідним опором, значення якого визначається виразом:

$$R_{ВХ} = R1 / K,$$

де $K$ – коефіцієнт підсилення підсилювача.

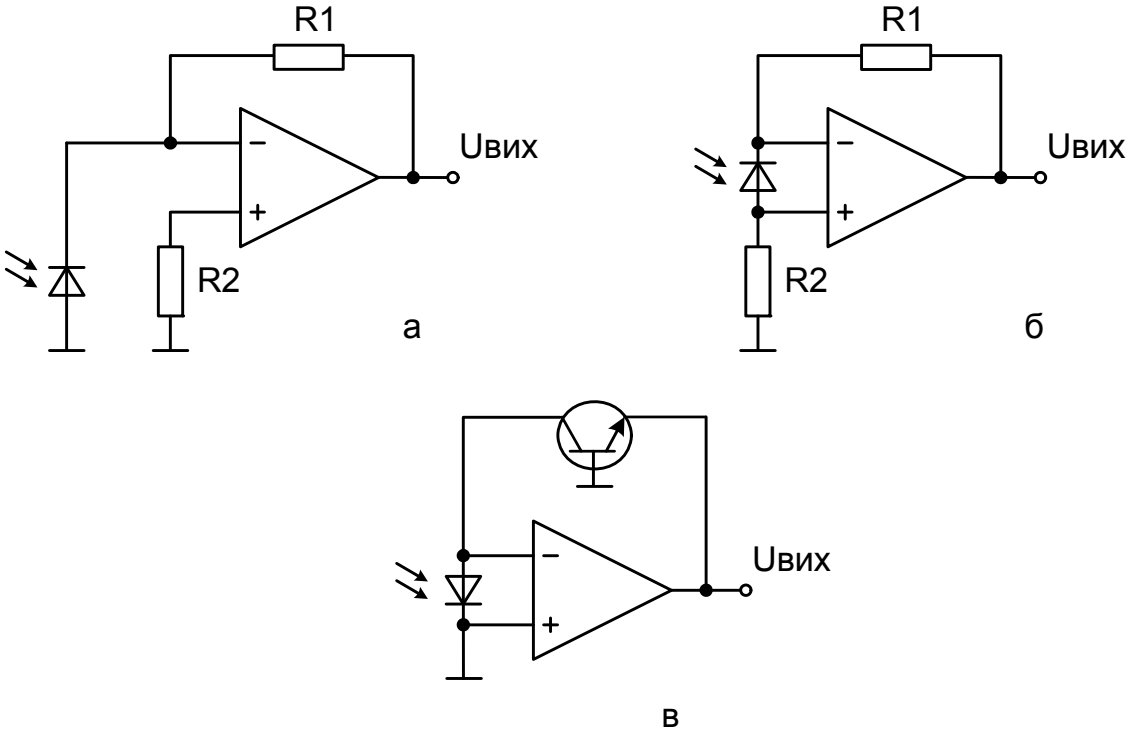



Рисунок 4.5 – Схеми ввімкнення фотодіодів в кола операційного підсилювача: а – фотодіодний режим; б, в – вентильний режим

Навантаження фотодіода на малий опір забезпечує лінійність енергетичної характеристики та високу швидкодію перемикання. Верхня

гранична частота перемикання, особливо у випадку застосування *p-i-n* фотодіода, обмежується швидкодією операційного підсилювача, яка підвищується зі зменшенням опору зворотного зв'язку.

Додатковою перевагою схеми є слабка чутливість до темнового струму, що підвищує температурну стабільність перетворювача. Крім того, у вихідній напрузі відсутня постійна складова, обумовлена темновим струмом.

У схемі на рис. 4.5, б фотодіод використовується у вентильному режимі як генератор струму, значення якого є прямопропорційним інтенсивності оптичного випромінювання (фотодіод працює в режимі короткого замикання). Вихідна напруга у цій схемі визначається виразом:

$$U_{ВИХ} = -I_{Ф} \cdot (R1 + R2).$$

Перевагою схеми є її нечутливість до температури, лінійність енергетичної характеристики та висока швидкодія.

Схема, яка наведена на рисунку 4.5 в, також використовує вентильний режим роботи фотодіода. Вона може бути використана у тих випадках, коли інтенсивність вхідного оптичного сигналу може змінюватися у широких межах. Операційний підсилювач у цій схемі працює в режимі логарифмічного підсилювача, в якому використовується логарифмічна залежність між напругою база-емітер та струмом колектора транзистора, ввімкненого у коло зворотного зв'язку. Фотострум, що генерується фотодіодом в режимі короткого замикання, протікаючи через транзистор створює на його емітері (на виході підсилювача) напругу. Ця напруга буде меншою за потенціал землі на величину спаду напруги на переході база-емітер транзистора. У результаті вихідна напруга буде пропорційною логарифму від величини фотоструму. Логарифмічна залежність між вхідним та вихідним сигналами схеми призводить до того, що вона є високочутливою для змін в області малих значень, і слабочутливою для змін в області великих значень. Завдяки цьому насичення вихідного сигналу, тобто досягнення ним рівня, при якому зміни вхідного сигналу вже не впливають на його значення, у порівнянні з

іншими схемами відбувається при значно більших рівнях освітленості. При цьому чутливість схеми для малих інтенсивностей вхідного оптичного сигналу залишається високою.

Для усунення впливу зовнішньої температури на параметри схем фотоприймальних модулів, використовують схеми температурної корекції. Найпростіша корекція здійснюється за допомогою термокомпенсуючих елементів, як такі використовують терморезистори з додатним коефіцієнтом опору або однотипні фотодіоди, що працюють у темновому режимі. В розглянутих вище схемах термокомпенсуюче коло можна увімкнути послідовно з фотодіодом.

У багатьох випадках крім температурної нестабільності приходиться боротися із фоновим засвічуванням фоточутливого елемента. Хороші результати при прийманні модульованого випромінювання за умов значного фонового засвічування дає використання вибіркових кіл (рис. 4.6).

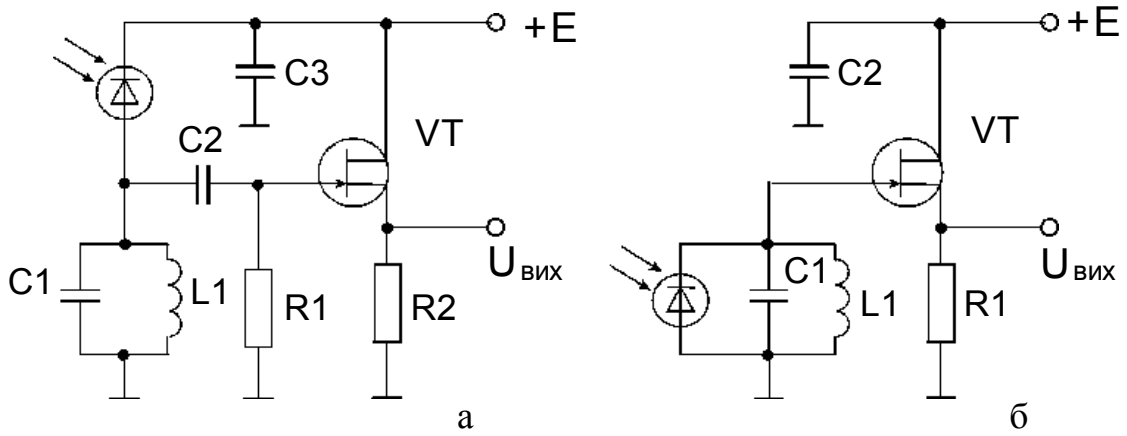



Рисунок 4.6 – Схеми з вибірковими колами для прийому модульованого випромінювання

Навантаженням фотодіода є паралельний контур з високою добротністю, настроєний на частоту сигналу, що приймається. Оскільки контур має вузьку смугу пропускання, то зі всього спектра фонового випромінювання виділяється лише дозволена частота, і, як наслідок, підвищується відношення сигналу до фонового засвічування. Крім того, зменшується рівень шумів на вході підсилювача. Сумарна ємність контуру включає ємності p-n переходу та входу транзистора, що також є однією з

переваг розглянутих схем.

Ще одним із способів виділення корисного сигналу на фоні постійного зовнішнього засвічування, є компенсація останнього. Компенсація фонового засвічування може бути досягнута при використанні диференціальних схем з додатковим фотоприймачем, який освітлюється лише фоном.

Поряд з розглянутими схемами фотоприймальних пристроїв, які здійснюють перетворення потужності оптичного сигналу в значення напруги або струму, використовуються частотні фотоперетворювачі. Перетворення потужності світлового потоку в частоту змінного електричного сигналу здійснюють за допомогою релаксаційних генераторів, у часозадавальне коло яких включають фотоприймач.

На рис. 4.7 наведені схеми частотних перетворювачів, в яких фотодіод керує роботою блокінг-генератора.

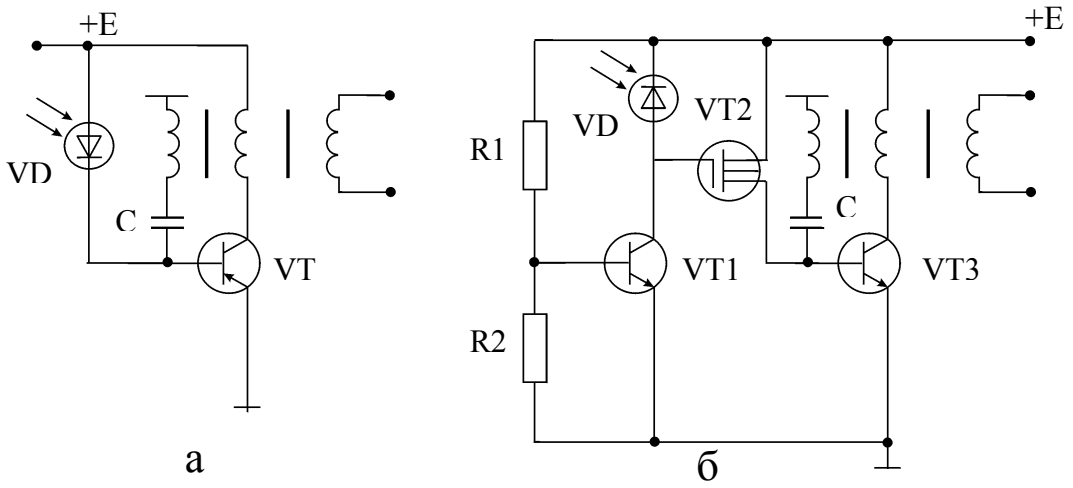



Рисунок 4.7 – Фотоелектричні частотні перетворювачі:

а – з керуванням блокінг-генератором на біполярному транзисторі;

б – з використанням польового транзистора для узгодження фотоприймача і блокінг-генератора

### 4.3 Схеми на основі фототранзисторів

Фотодіоди (з *p-n*-переходом та *p-i-n*) є прекрасними детекторами випромінювання в умовах порівняно високих значень інтенсивностей. Проте, якщо інтенсивність оптичного сигналу є малою, вихідний сигнал фотодіода також виявляється занадто малим. При таких умовах краще використовувати фототранзистори, що мають значно більший вихідний струм ніж фотодіоди при порівнянних умовах освітлення. Слід пам'ятати, що підсилення фотоструму у фототранзисторі лише покращує їх властивість детектування дуже малих рівнів освітлення і ніяк не впливає на такий параметр як чутливість, поріг якої визначається темновим струмом. Зазначимо також, що за порівнянням з фотодіодами фототранзистори характеризуються меншою швидкодією.

Основною схемою вмикання фототранзистора є схема із загальним емітером, оскільки вона дозволяє отримати найбільше підсилення. Розрізняють два основних способи ввімкнення фототранзисторів: з від'єднаною базою та з приєднаною.

При першому способі, який є найпростіший, фототранзистор використовується як двополюсник. Фотоприймач характеризується при цьому найбільшим підсиленням, але невисокою швидкодією та температурною стабільністю.

Вмикання фототранзистора з приєднаною базою дозволяє керувати положенням робочої точки, зменшити темновий струм через колекторний перехід, підвищити граничну частоту. Крім того, фототранзистор може функціонувати як фотодіод. Для цього, зазвичай, з'єднують базовий та емітерні електроди і використовують перехід колектор-база, площа якого більша за площу емітерного переходу.

Порівняно з фотодіодами фототранзистори рідко використовуються для роботи зі слабкими сигналами, а у випадку прийому модульованих сигналів строгі вимоги ставляться до стабілізації робочої точки. У той же час досить високе підсилення фотоструму, в результаті чого часто зникає необхідність у проміжних підсилювачах, успішна робота з немодульованими сигналами, високими рівнями випромінювання, стали передумовою широкого використання фототранзисторів у різних порогових

схемах.

На рисунку 4.8 показані варіанти ввімкнення фототранзистора.

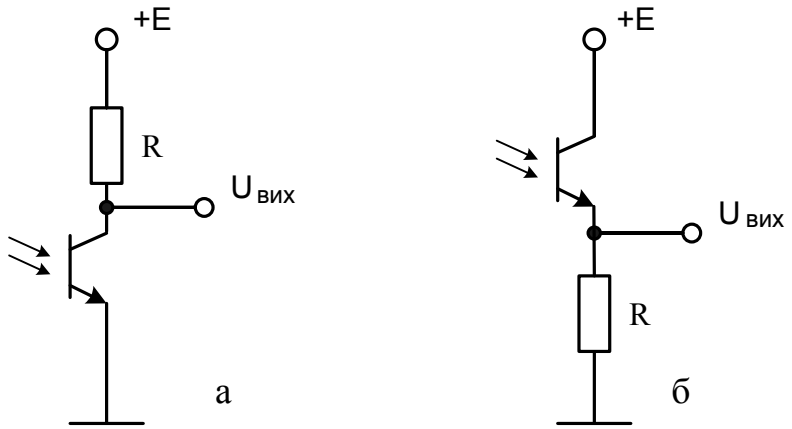



Рисунок 4.8 – Варіанти ввімкнення фототранзистора

Зображені схеми можуть використовуватися як самостійно, так і виступати у ролі вхідних кіл підсилювальних каскадів. При першому варіанті, який є найпростішим, наведені схеми можна розглядати як оптично керований ключ, що може застосовуватися для комутації напруги у слабкострумовому навантаженні, яке може бути підключене не лише до виходу схеми, а й замість резистора R.

У другому варіанті, навантаженням є вхідний опір підсилювача. Якщо, наприклад, як підсилювач використати транзисторний каскад зі схемою із загальним емітером, то при використанні варіанта, що наведений на рис. 4.8, б, отримаємо схему фотоприймального пристрою, аналогічну до схеми на рис. 4.3, а, з тією різницею, що в ній замість фотодіода використаний фототранзистор.

Основним недоліком розглядуваних варіантів ввімкнення фототранзисторів, є те, що під час перемикання фототранзистора, яке супроводжується зміною потенціалу колектора (у схемі на рис. 4.8, а) або бази (у схемі на рис. 4.8, б потенціали бази та емітера змінюється майже однаково, бо відрізняються між собою на постійний спад напруги на прямо зміщеному переході база-емітер), ємність колекторно-базового переходу перезаряджається відносно малим фотострумом бази. Тому ці схеми знаходять застосування при малих частотах перемикань, наприклад, в різноманітних фотореле, де фототранзистор використовується для

керування електромеханічним реле або тиристором (рис. 4.9).

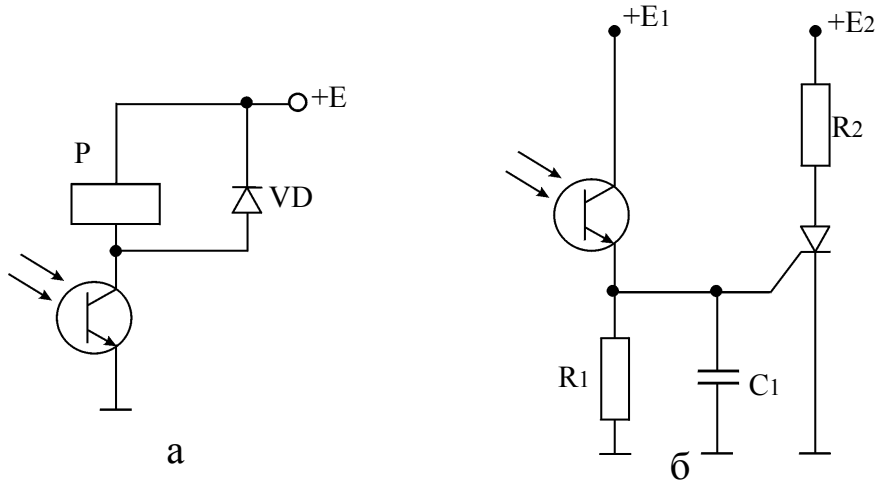



Рисунок 4.9 – Фотореле: а – на електромеханічному реле; б – на тиристорі

Необхідною умовою при побудові таких схем є перевищення струму колектора, який відповідає певному значенню інтенсивності оптичного сигналу, над порогом спрацювання керованого елемента. У схемі на рисунку 4.9, а діод захищає фототранзистор від ЕРС самоіндукції реле у момент його вимикання. Поріг спрацьовування тиристора (рис. 4.9, б) встановлюється опором R1. Конденсатор C1 перешкоджає відпиранню тиристора при короткочасних змінах освітленості, стрибках напруги або струму в мережі.

При комутації більш потужних кіл, а також у фотореле з великою чутливістю фототранзистори нерідко вмикають за схемою Дарлінгтона (рис. 4.10).

Загальний коефіцієнт підсилення первинного фотоструму схем дорівнює добутку коефіцієнтів підсилення фототранзистора та транзистора. Реле Р (рис. 4.10, а,б) спрацьовують при надходженні світлового сигналу. У схемах з тиристорами подільники напруги R1, R2 задають напругу на колекторах транзисторів, яка звичайно значно менша за значення комутованої напруги Е. Фотореле, схема якого наведена на рисунку 4.10, в, спрацьовує при освітленні фототранзистора, а фотореле, зображене на рисунку 4.10, г, - при його затемненні.

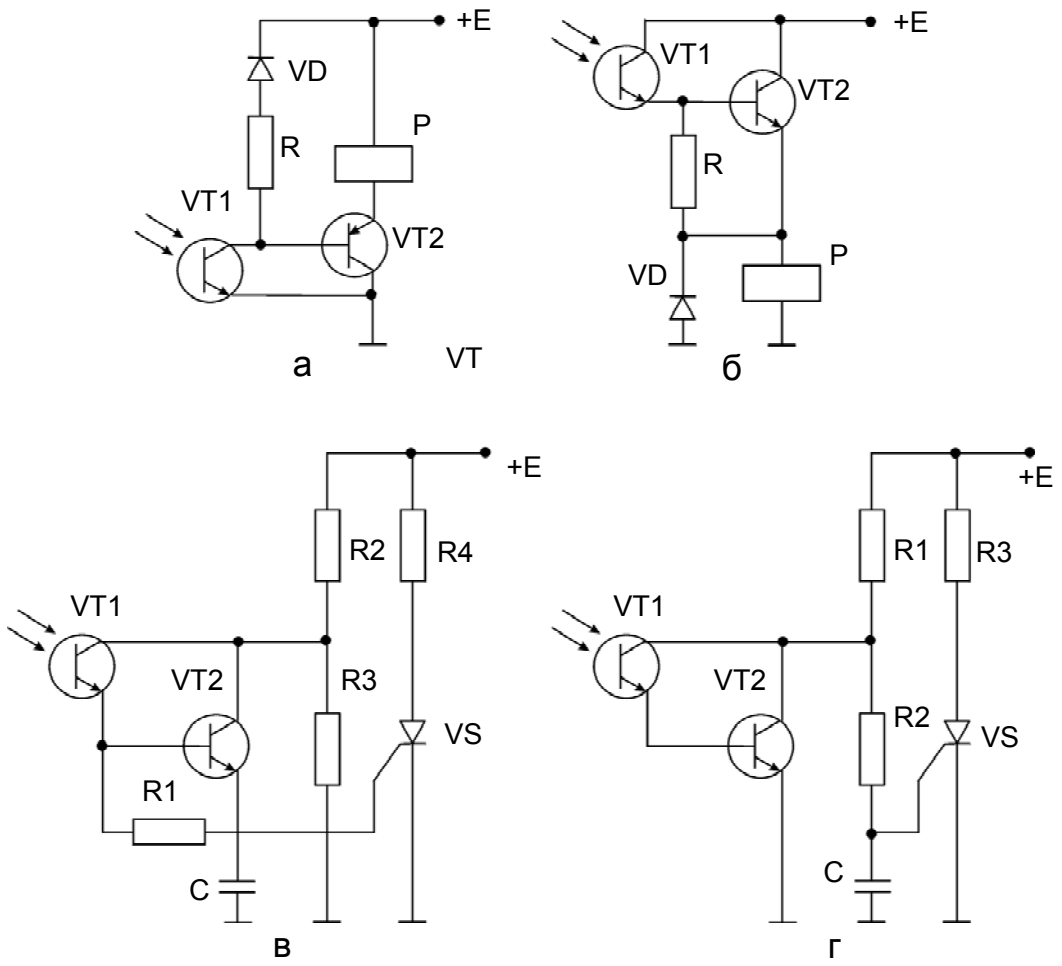



Рисунок 4.10 – Фотореле з ввімкненням фототранзисторів за схемою Дарлінгтона: а, б – на електромеханічних реле; в, г – на тиристорах

Розглянуті схеми працюють у ключовому режимі, тобто для них визначальним є те, чи є світловий потік на вході, чи ні. Іноді виникає необхідність вмикання навантаження за умови досягнення інтенсивністю світлового потоку певного значення. Наприклад, автоматичного вмикання/вимикання світла в залежності від умов зовнішньої освітленості. При цьому треба врахувати те, що в момент досягнення світловим потоком значення порогу спрацювання схеми, можуть спостерігатися випадкові незначні відхилення в інтенсивності випромінювання. На рис. 4.11 наведена схема фотореле з тригером Шмітта, в якій за рахунок гістерезисної передавальної характеристики усуваються хибні перемикання реле при незначних коливаннях інтенсивності оптичного випромінювання.

На інвертуючий вхід операційного підсилювача подається половина

напруги живлення, а на неінвертуючий – напруга, що залежить від освітленості фототранзистора VT1. Резистор R4 є опором зворотного зв'язку. При освітленості фотоприймача напруга на неінвертуючому вході зростає і при досягненні половини напруги живлення вихід тригера переходить зі стану низького рівня (~ 0 В) до високого (~ Е). При зменшенні напруги живлення чутливість тригера зростає. Це обумовлено тим, що порогова напруга Е/2 на резисторі R1 буде досягатися при менших значеннях фотоструму, а значить і при менших значеннях інтенсивності оптичного випромінювання. Гістерезис тригера Шмітта визначається відношенням R4/R1.

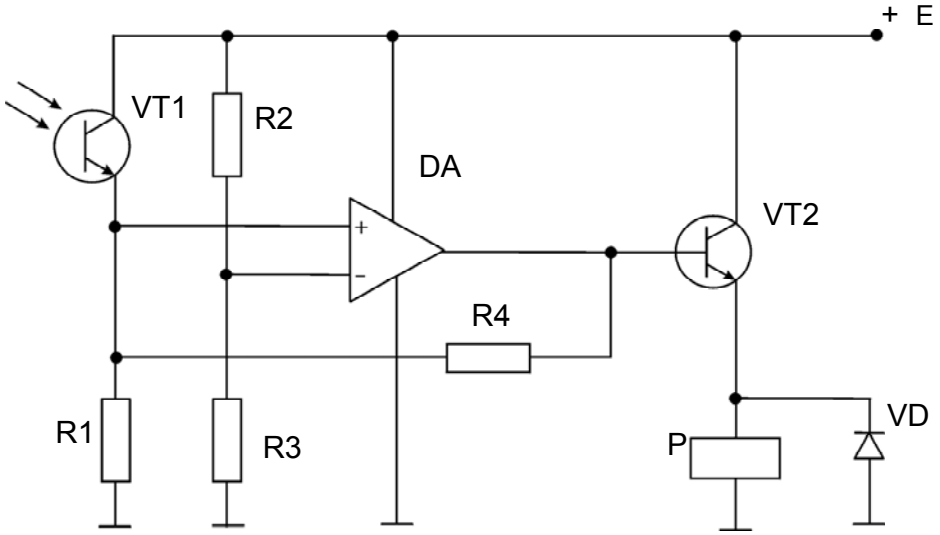



Рисунок 4.11 – Фотореле з тригером Шмітта

Ввімкнення фототранзисторів в розглянутих схемах, як вже було зазначено вище, не відрізняється високою швидкодією. Більш високі частоти перемикання можна отримати, якщо потенціали колектора та емітера фототранзистора підтримувати постійними, що дозволить позбавитися від небажаного перезаряду ємності колекторно-емітерного переходу. Цього можна досягти, наприклад, якщо в емітерне коло фототранзистора (рис. 4.8, б) замість резистора увімкнути перетворювач струм-напруга з малим вхідним опором. У результаті, потенціал емітера при змінах струму, що протікає через транзистор, буде змінюватися дуже слабо. В ідеальному випадку, коли використовується перетворювач з нульовим вхідним опором, потенціал емітера буде залишатися постійним.

Перетворювач струм-напруга, який за своїми характеристиками наближається до ідеального, може бути реалізований на операційному підсилювачі. Варіант підключення фототранзистора до такого перетворювача наведений на рисунку 4.12.

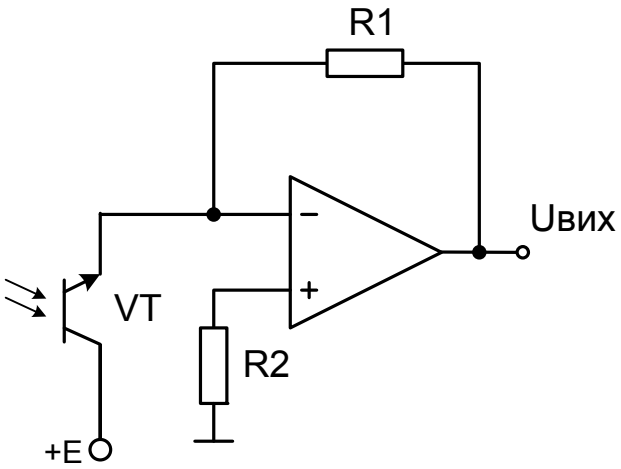



Рисунок 4.12 – Схема фотоприймального пристрою з підвищеною швидкодією

На рисунку 4.13 наведений ще один приклад схеми з підвищеною швидкодією, в якій постійність потенціалу колектора фототранзистора підтримується за допомогою біполярного транзистора, ввімкненого за схемою із загальною базою.

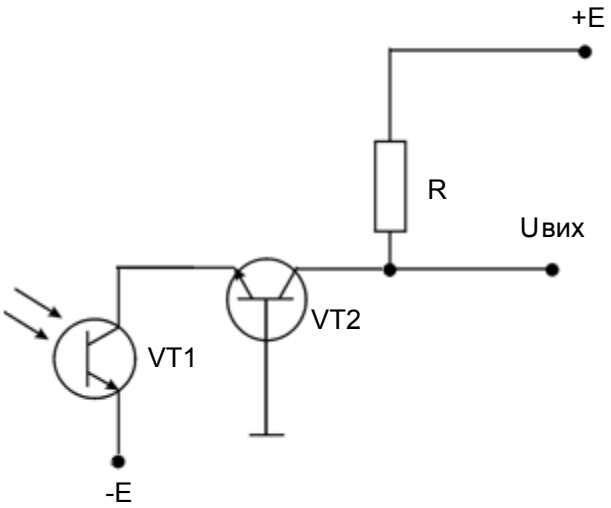



Рисунок 4.13 – Схема фотоприймального пристрою з підвищеною швидкодією

Вхідний опір транзистора VT2 є малим (кілька Ом або кілька десятків Ом), тому коливання колекторного струму фототранзистора VT1, що обумовлені зміною інтенсивності світлового потоку, майже не викликають змін потенціалу його колектора. Значення потенціалу колектора фототранзистора VT1 є більшим за потенціал землі на величину спаду напруги на емітерному переході транзистора VT2.

При використанні підключення базового виводу фототранзисторів можуть бути отримані достатньо прості схеми з певними корисними якостями. Так, наприклад, можна отримати оптично керовані пристрої з двома стійкими станами, аналогічні до фототиристорів або тригерів.

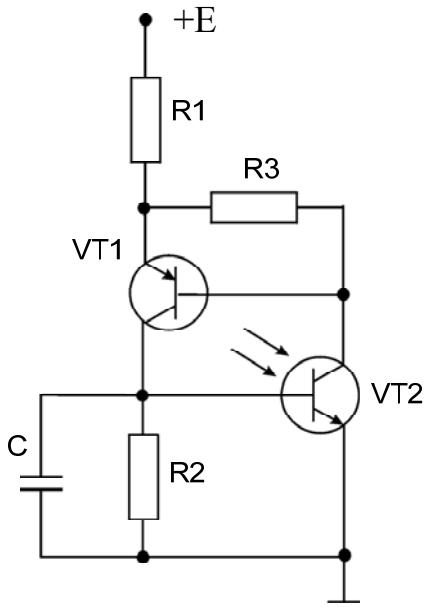



Рисунок 4.14 – Перетворювач типу фототиристор

Схема на рисунку 4.14 функціонує як фототиристор. У вихідному стані транзистор VT1 закритий. При освітленні фототранзистора VT2, його колекторний струм зростає, внаслідок чого потенціал його колектора зменшується. Це обумовлює відкриття транзистора VT1. Відкриття транзистора VT1 та збільшення внаслідок цього струм у його колі, збільшує спад напруги на резисторі R2. Ця напруга буде підтримувати фототранзистор VT2 у відкритому стані навіть при припиненні його освітлення, що, у свою чергу, залишить транзистор VT1у відкритому стані.

Поріг спрацьовування схеми задається значенням опору R3, через який протікає частина фотоструму. Конденсатор C усуває хибні

спрацювання пристрою при короткочасних стрибках напруги живлення. Вимикання схеми, тобто для переведення її транзисторів у закритий стан, відбувається при зменшенні напруги живлення.

Одна з можливих схем типу фототригера наведена на рисунку 4.15.

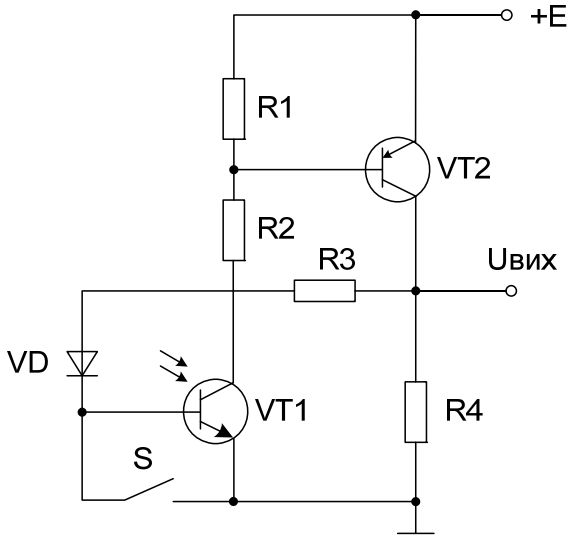



Рисунок 4.15 – Фототригер на фототранзисторі

При відсутності освітлення транзистор VT2 є відкритим. Дія оптичного сигналу на фототранзистор VT1 збільшує його колекторний струм. При цьому збільшується і струм бази VT2. Транзистор VT2 відкривається. Напруга на резисторі R4 зростає. Збільшення напруги на резисторі R4 через резистор R3 передається на базу фототранзистора VT1, ще більше відкриваючи його. В результаті тригер перекидається в другий стійкий стан, навіть при припиненні освітлення фототранзистора. Діод запобігає втратам фотоструму через R3.

При замиканні кнопки *S*, фототранзистор закривається. Його колекторний струм зменшується, що викликає закривання транзистора VT2. У результаті схема повертається у початковий стійкий стан.

Використання фототранзисторів для сприйняття модульованого випромінювання, як уже відзначалось, обмежується нестабільністю заданого положення робочої точки. Так, за наявності фонового засвічування, інтенсивність якого може повільно змінюватися, струм покою фототранзистора також буде змінюватися. Це викликає спотворення

сигналу, що приймається. Стабілізувати положення робочої точки в умовах фонового засвічування вдається за рахунок використання негативного зворотного зв'язку. Прикладом може служити емітерний повторювач, схема якого зображена на рисунку 4.16.

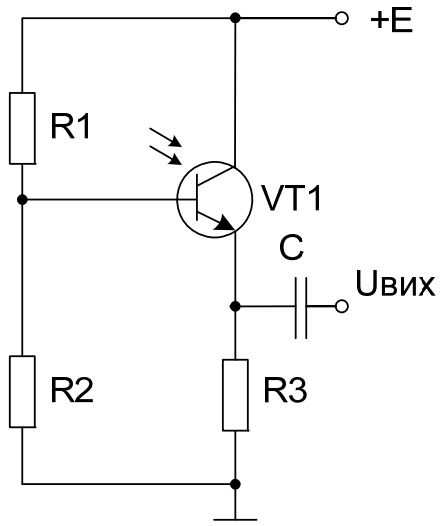



Рисунок 4.16 – Вмикання фототранзистора за схемою емітерного повторювача при прийомі модульованого випромінювання

Положення робочої точки у темновому режим задається подільником на резисторах R1, R2. Наявність фонового засвічування викликає збільшення струму, що протікає у колі колектор-емітер транзистора. Спад напруги на резисторі R3 збільшується, що веде до підвищення потенціалу емітера фототранзистора. Оскільки потенціал бази є зафіксованим подільником напруги на резисторах R1, R2, підвищення потенціалу емітера, викликає зменшення напруги база-емітер, і як наслідок, зменшення колекторного та емітерного струмів. У результаті напруга на резисторі R3, яка є вихідною напругою каскаду, зменшується. Результуючий приріст вихідної напруги, обумовлений наявністю фонового засвічування, виявляється достатньо малим для суттєвого спотворення корисного сигналу, навіть при високих значеннях інтенсивності фонового засвічування

Як і в схемах на основі фотодіодів, в схемах з фототранзисторами приходиться підтримувати постійність параметрів в умовах коливання

температури. Як термокомпенсуючий елемент у колах з фототранзисторами частіше використовуються однотипні фотоприймачі.

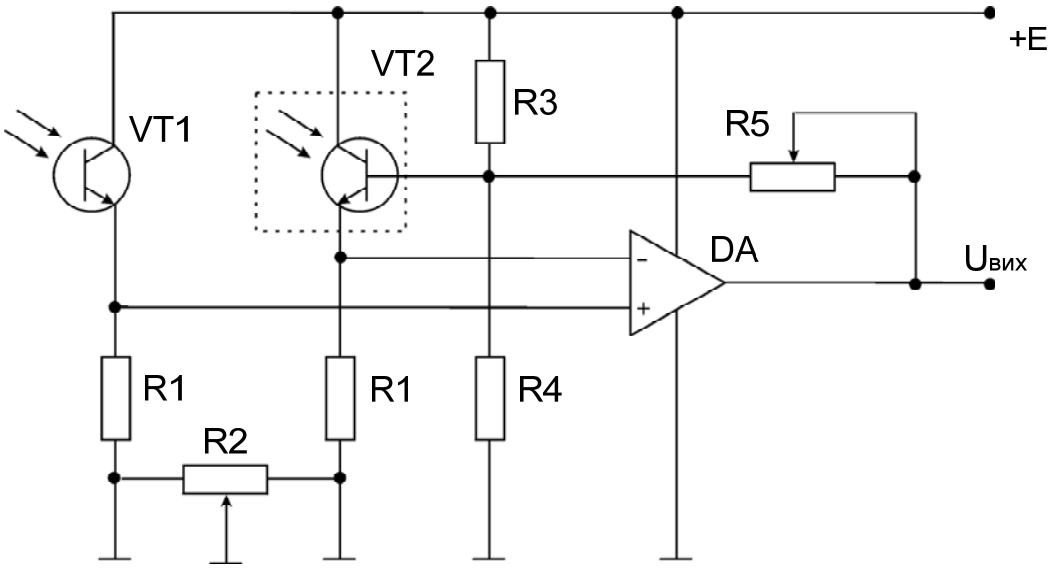



Рисунок 4.17 – Схема з корекцією температурної нестабільності фотоприймача

На рис. 4.17 фототранзистори увімкнені за диференціальною схемою. Операційний підсилювач підсилює корисний сигнал, який виникає внаслідок різниці освітленостей фотоприймачів (один з них може бути затемнений), і приглушує синфазні складові, що залежать від температури.

Початкове балансування фази, яке необхідно робити внаслідок розкиду параметрів фототранзистора та неідеальності операційного підсилювача, здійснюється за допомогою потенціометра R2 (R2<R1). Коефіцієнт підсилення регулюється за допомогою R5.

**Контрольні питання**

1. Проаналізуйте основні варіанти схемотехнічного використання фоторезисторів.

2. Проаналізуйте можливі варіанти ввімкнення фотодіодів у підсилювальні каскади на основі біполярних та польових транзисторів.

3. Проаналізуйте можливі варіанти ввімкнення фотодіодів у кола операційних підсилювачів.

4. Проаналізуйте схемотехніку фотодіодних перетворювачів потужність оптичного випромінювання–частота.

5. Проаналізуйте схемотехніку перемикальних пристроїв на основі фототранзисторів. Запропонуйте варіант будь-якого з цих пристроїв, в якому замість фототранзистора використовується фотодіод.

6. Як треба змінити схему фотореле з тригером Шмітта, щоб вмикання навантаження відбувалося при зменшенні освітленості? Які зміни треба внести у цю схему, щоб можна було регулювати поріг вмикання?

7. Проаналізуйте схемотехнічні методи компенсації фонових засвічувань

8. Як можна підвищити швидкість схем на фтототранзисторах? Які схемотехнічні підходи можуть бути використані для цього?

9. Проаналізуйте схему фототригера. Чи може вона бути реалізована на фотодіоді? Які зміни треба внеси у цю схему, щоб її скидання також, як і встановлення, відбувалося під дією оптичного сигналу?

10. Проаналізуйте схемотехнічні методи температурної корекції фотоприймальних пристроїв на основі фототранзисторів.

11. Чи може схема, що наведена на рисунку 4.17, бути використана для компенсації фонових засвічувань? Відповідь поясність.

# 5 ОПТОЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

## 5.1 Оптолектронні логічні елементи

Застосування оптелектронних елементів – один із шляхів створення багатофункціональних однорідних обчислювальних середовищ, швидкодія яких була б порядка $10^{-9}...10^{-10}$ с. Для підтримання однорідності при побудові пристроїв керування різноманітних оптоелектронних операційних систем обробітки інформації необхідні оптоелектронні логічні схеми.

В оптоелектронних функціональних пристроях керування може здійснюватися як оптичними, так і електричними сигналами. Оскільки електричний сигнал може бути легко перетворений в оптичний за допомогою світлодіода, то оптоелектронні логічні елементи з електричним та оптичним керуванням будуть розрізнятися тільки вхідним колом: логічні вентилі з електричним керуванням будуть містити на вході світлодіод, оптично зв'язаний оптично керованим комутуючим елементом, наприклад з фототранзистором.

На рис. 5.1 зображені оптоелектронні елементи, які дозволяють реалізовувати основні логічні функції в цифрових оптоелектронних пристроях. Так, схема, наведена на рис. 5.1, а, реалізує операцію логічного множення, а на рис. 5.1, б – операцію логічного додавання.

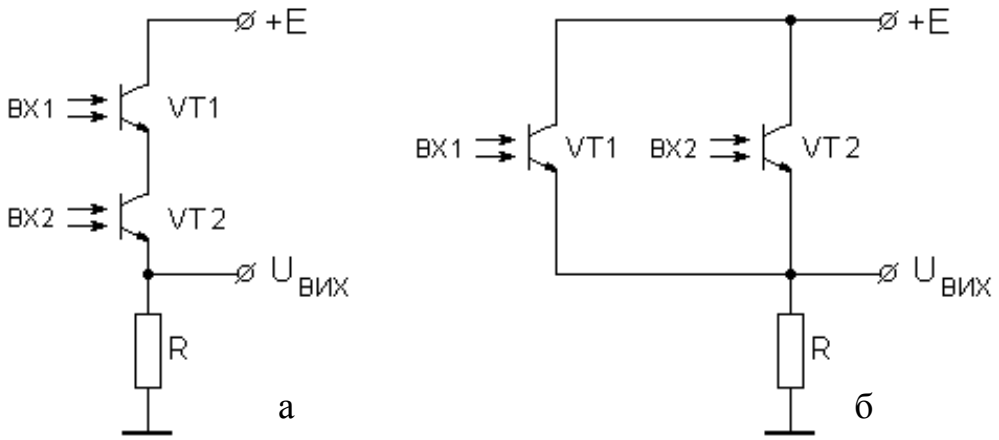



Рисунок 5.1 – Логічні оптоелектронні елементи:
а – елемент "І"; б – елемент "АБО"

У першому випадку вихідна напруга $U_{ВИХ}$ буде мати високий рівень, близький до напруги живлення Е, тільки якщо обидва фототранзистори будуть увімкнені, тобто тоді, коли потужність оптичного випромінювання

на обох входах буде відрізнятися від нуля. У схемі на рис. 5.1, б вихідна напруга буде за рівнем близькою до Е, якщо освітлюється хоча б один з фототранзисторів.

Логічна операція “НІ” може бути реалізована елементами, зображеними на рис. 5.2.

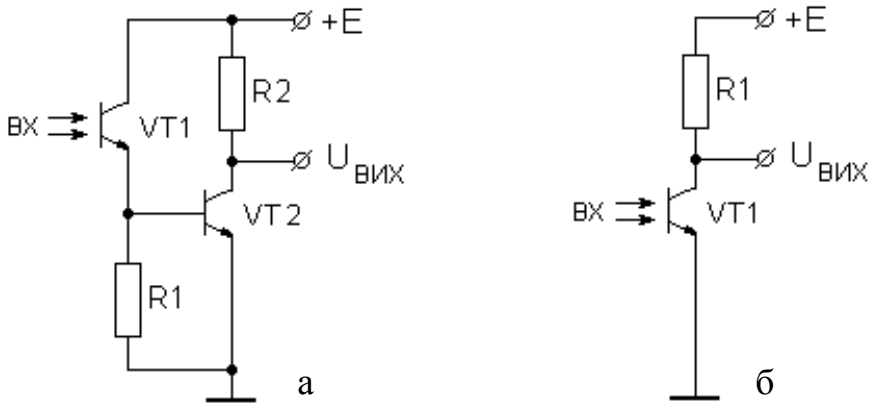



Рисунок 5.2 – Оптоелектронний елемент “НІ”

Схема на рис. 5.2, а складається з двох каскадів. Перший каскад на фототранзисторі VT1 виконує функції повторювача – напруга на резисторі R1 має високий рівень при наявності вхідного оптичного сигналу і низький рівень при його відсутності. Другий каскад, зібраний на транзисторі VT2, є інвертуючим. При високому рівні напруги на базі транзистора VT2 (на резисторі *R*2), транзистор є відкритим і вихідна напруга $U_{ВИХ}$ є близькою до нуля. Коли напруга на базі VT2 буде приблизно дорівнювати нулю, транзистор VT2 буде закритий і вихідна напруга буде за рівнем близькою до Е.

Для реалізації інвертора можна використовувати один інвертуючий каскад, зібраний на фототранзисторі (рис. 5.2, б).

### 5.2 Багатофункціональні оптоелектронні елементи

Оптоелектронні пристрої мають ознаки багатофункціональності. Ознаки природної та вимушеної багатофункціональності повинні мати, у першу чергу, базові елементи операційних структур. Їх особливістю є те, що множина функцій виконується при порівняно невеликій кількості входів керування. Скорочення кількості входів керування досягається за рахунок

використання способу подання інформації у вигляді мінімального дискрета часу, який визначається часом спрацьовування активного елемента пам'яті.

Операційні структури інформаційно-вимірювальних та обчислювальних структур будуються на багатофункціональних оптоелектронних модулях. Для побудови таких модулів необхідні базисні оптоелектронні елементи, що працюють у регеративному режимі. Оскільки такі елементи в оптоелектронних логіко-часових обчислювальних середовищах реалізують принцип перетворення інформації шляхом квантування часу, вони отримали назву квантронів. Таким чином квантрон є структурним елементом однорідного обчислювального середовища, в якому аналогова та цифрова обробка інформації супроводжується запам'ятовуванням та індикацією результатів.

Загальна структурна схема оптоквантрона зображена на рис. 5.3.

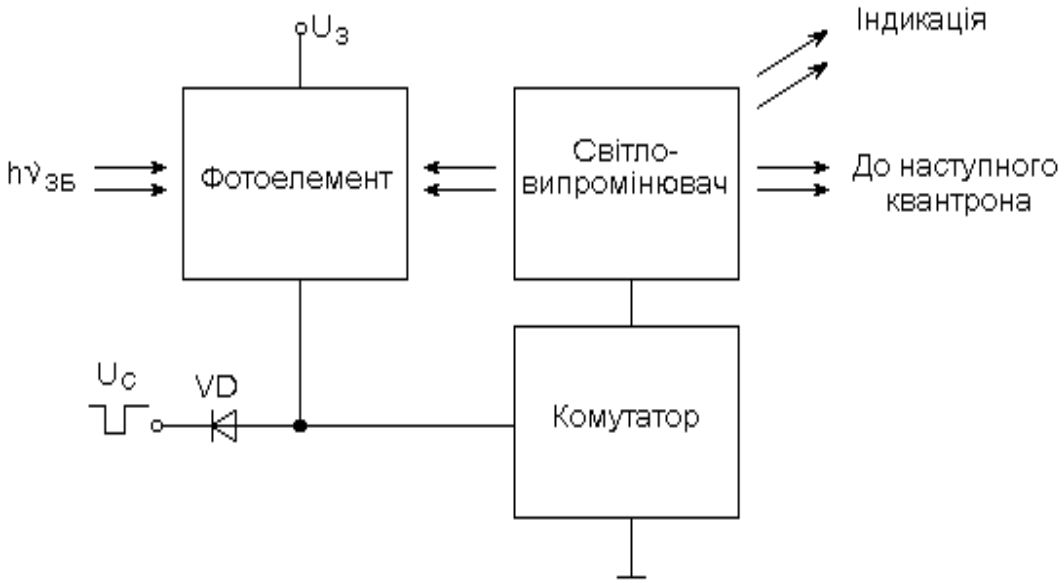



Рисунок 5.3 – Структурна схема оптоквантрона

При одночасній дії на квантрон світлового потоку збудження $h\nu_{зб}$ та напруги засвічування $U_з$ струм $I_ф$ фотоелемента стає достатнім для переходу комутатора із закритого стану у відкритий. У результаті збільшується струм, який тече крізь світловипромінювач, і, як наслідок, електрична енергія перетворюється у світлову. Частина світлового потоку використовується для утворення зворотного зв'язку, частина - для індикації стану квантрона, решта - для спрацьовування наступного квантрона. Час $\tau$, за який світловипромінювач переходить до збудженого стану, (час

спрацьовування квантрона), визначає мінімальну тривалість світлового потоку збудження, тобто тривалість одного кванта часу.

Якщо після завершення часу τ опромінення зовнішнім світловим потоком закінчується, оптоквантрон залишається в збудженому стані, оскільки світловипромінювач, утворюючи крізь фотоелемент частиною світлового потоку зворотний зв'язок, підтримує комутатор у відкритому стані. Тому у стані збудження оптоквантрон може знаходитися необмежено довго. Для виведення із цього стану необхідно подати імпульс напруги скидання $U_c$, який закриє комутатор. Коли комутатор закриється, струм, що тече крізь світловипромінювач, зменшиться практично до нуля. Світловипромінювач вийде із стану збудження і зворотний зв'язок розімкнеться. У цьому стані квантрон буде перебувати до приходу наступного світлового потоку збудження.

З наведеного опису видно, що оптоквантрон фактично виконує функції активного елемента пам'яті, тобто звичайного тригера, але з двома суттєвими відмінностями. По-перше, тригер не може бути побудований на одному активному елементі (транзисторі). По-друге, у тригері необхідна наявність двох кіл позитивного зворотного зв'язку, а у квантроні достатньо лише одного.

Електрична схема оптоквантрона зображена на рис. 5.4. Його режим визначається струмом світлодіода (СД), що задається рівнем збудження фотодіода (ФД) і коефіцієнтом підсилення каскаду на транзисторі VT.

При відсутності вхідного оптичного сигналу $I_{СД} < I_0$ ($I_0$ – граничне значення струму збудження СД), що визначає виключений (нульовий) стан квантрона. Стану "включено" відповідає нерівність $I_{СД} > I_0$, що означає світіння СД при появі світлового сигналу на оптичному виході квантрона.

Наявність оптичних та електричних входів і виходів, оптичного внутрішнього позитивного зворотного зв'язку визначає квантрон як елемент пам'яті й індикації. Квантрон може працювати в режимі генератора імпульсів з електричним і оптичним керуванням. Частота такого генератора може варіюватися в широких межах, а схема не містить реактивних елементів.

Можливість поєднання функцій пам'яті й індикації у квантроні обумовлена його структурою. Принципова схема квантрона (див. рис. 5.4)

містить вхідні світлодіоди СД1, СД2, вихідний світлодіод СД3, фотодіод ФД1, ФД2 для прийому оптичної інформації, фотодіод ФД3 для запам'ятовування інформації, підсилювач на транзисторі VT та розв’язувальні діоди VD1, VD2.

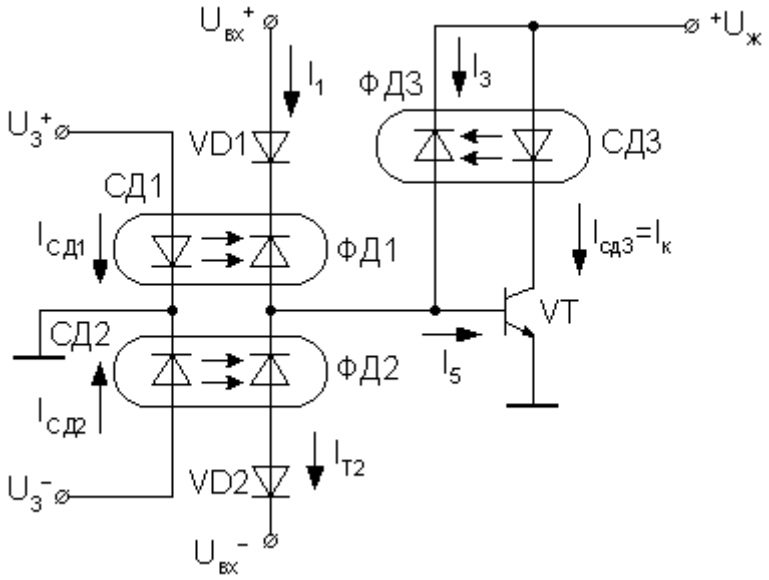



Рисунок 5.4 – Схема оптоквантрона

Для забезпечення тригерного режиму схеми на її вхід $U_{вх}$ подається позитивний потенціал, а для здійснення оптичного запуску застосовується підживлення електричним сигналом $U^{+}_{3}$. Для виникнення тригерного ефекту необхідно, щоб коефіцієнт передачі струму розімкнутого контуру позитивного оптичного зворотного зв'язку був

$$\beta_{3.3} = \alpha \cdot j \cdot \beta > 1,$$

де $\alpha$ - коефіцієнт світловіддачі СД;

$j$ - коефіцієнт ефективності ФД;

$\beta$ - коефіцієнт підсилення транзистора.

Нульовому стану квантрона відповідає нерівність

$$I_{K.0} + \beta I_{ФД3} \le I_0, \qquad (5.1)$$

де $I_{K.0}$ - зворотний колекторний струм транзистора;

$I_{ФД3}$ - струм ФД у провідному стані.

Нерівність (5.1) легко виконується для темнових струмів $I_T$ фотодіодів, які для кремнієвих приймачів $I_T < 10^{-10} A$ . У режимі фотозбудження $I_{ФДЗ} >> I_{ТЗ}$, що приводить до зміни знака (5.1) на протилежний. Унаслідок цього зростають глибина позитивного оптичного зворотного зв'язку СДЗ-ФДЗ і колекторний струм транзистора VT, що швидко входить у режим насичення. У цьому стані яскравість світіння СДЗ досягає максимального значення. Відповідно до рис. 5.4 струм ввімкнення оптронного ключа ФДЗ-СДЗ

$$I_{свкл} = I_{СД1}\alpha_1 j_1 + I_{T1} - I_{T2} + \frac{E - U_{КЗ}}{R_{СДЗ}}\alpha 3 j_3 + I_{ТЗ} .$$

Для вимикання квантрона необхідно подати електричний сигнал скидання. При цьому спрацьовує оптрон СД2-ФД2, перехід емітер-база транзистора шунтується малим опором ФД2 і транзистор виводиться з насичення на активну ділянку. Процес вимикання, як і процес ввімкнення, носить стрибкоподібний характер, при цьому струм вимикання

$$I_{ВИМ} = I_\sigma = (I_{СДЗ}\alpha_3 j_3 + I_{T1} + I_{T3}) - (I_{T2} + I_{СД2}\alpha_2 j_2) = \\ = \frac{SI_{К.Н.} - I_{СД2}\alpha_2 j_2 \beta}{\beta} + I_{T1} - I_{T2} + I_{T3} .$$

З тригерного режиму квантрон може бути переведений у режим генератора розривних коливань, нелінійним елементом якого є транзистор VT1 (рис. 5.5).

У цьому режимі на його базу подається від незалежного джерела напруга зсуву $U_{У1}$, що визначає частоту коливання генератора. При увімкнутій напрузі живлення $+U_Ж$ транзистор VT1 знаходиться в режимі насичення, його колекторний струм:

$$I_K = I_{К.Н} = \beta I_\sigma = I_{СД} > I_0 .$$

Струм $I_K = I_{СД}$ визначає інтенсивність випромінювання СД, яка повинна бути достатньою для виконання умови $\alpha \cdot j \cdot \beta > 1$, при досягненні якої формується вершина імпульсу. Тривалість вершини імпульсу

обмежується інерційністю ФД. Процес розсмоктування зарядів з області бази VT1 визначає задній фронт імпульсу. При $I_k < I_0$ формується пауза між імпульсами, тривалість якої залежить від схемної релаксації, обумовленої RC-параметрами СД. Значення керуючої напруги $U_{Y1}$ визначає час заряду ємностей *p-n* переходів СД і VT, унаслідок чого змінюється частота проходження імпульсів.

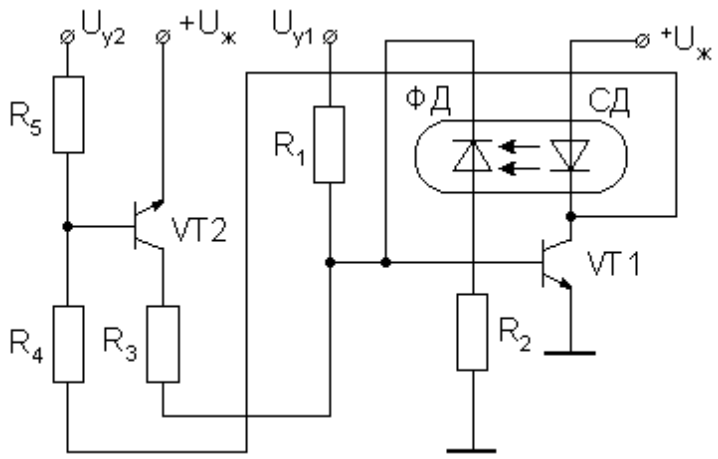



Рисунок 5.5 – Оптоелектронний генератор

Зміною зсуву транзистора VT2 оптронний генератор може бути приведений у режим очікування. Подача негативних імпульсів $U_{Y2}$ на базу VT2 переводить транзистор у режим насичення, що забезпечує запуск транзистора VT1. Далі процеси формування вершини імпульсу, заднього фронту і паузи між імпульсами відбуваються аналогічно розглянутому режиму ВЧ генерації. З надходженням на керуючий вхід $U_{Y2}$ імпульсу позитивної полярності транзистори VTI і VT2 закриваються. Завдяки зворотному зв'язку через резистор *R*4 транзистор VT2 утримується в замкненому стані після припинення дії керуючого імпульсу.

Режим очікувального генератора, дозволяє тактувати роботу СД відповідно до надходження керуючих імпульсів $U_{Y2}$. Це робить режим індикації квантрона більш гнучким і економічним.

Частота генерації оптронного генератора обмежується часом релаксації фотоструму фотоприймача. У сучасних швидкодіючих ФД час встановлення фотострумів не перевищує $10^{-8}$...>$10^{-10}$ с. Це визначає ВЧ режим генератора. Для реалізації НЧ режиму потрібні фотоприймачі зі збільшеним часом релаксація фотоструму, як, наприклад, у фоторезисторів.

У принциповій схемі НЧ оптронного генератора на фоторезисторах (рис. 5.6) використовується та ж ідея динамічної пам’яті фоторезисторів, що й у τ -фільтрах і коммутуючих оптронних ключах.

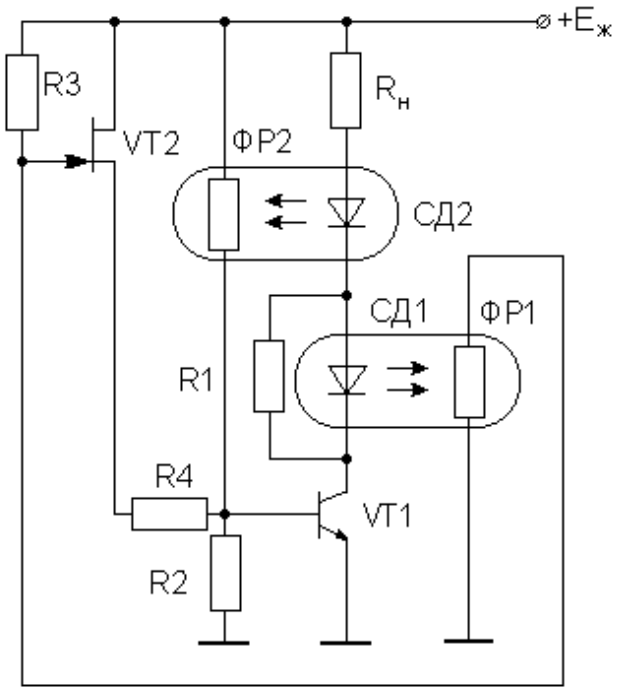



Рисунок 5.6 – Оптоелектронний генератор низькочастотних коливань

У цій схемі як основний часозадаючий процес використовується зменшення струму, що протікає крізь фоторезистор ФР1 і резистор R3, який задає режим польового транзистора VT2. Інтервал часу, протягом якого транзистор VT2 буде замкнений, визначається значенням опору резистора R3 і постійної зменшення фотоструму $\tau_{сп}$ фоторезистора ФРl. Чим вище значення $\tau_{сп}$, тим більший цей інтервал, що обумовлює отримання пауз між імпульсами великої тривалості. Змінюючи опір резистора R3 можна змінювати $\tau_{сп}$ від мілісекунд до хвилин. Змінюючи опір резистора Rl, можна змінювати час світіння СД2, а отже, тривалість генерованих імпульсів. Моделювання динамічної пам’яті на процесах релаксації фотострумів дозволяє виключити із схеми великогабаритні RC-компоненти, мінімізувати й уніфікувати схемні рішення.

Розглянемо приклад розрахунку елемента індикації з пам'яттю, що може бути використаний як комірка динамічного табло і гістограмного дисплея.

На рис. 5.7 зображена принципова схема елемента індикації з

пам’яттю.

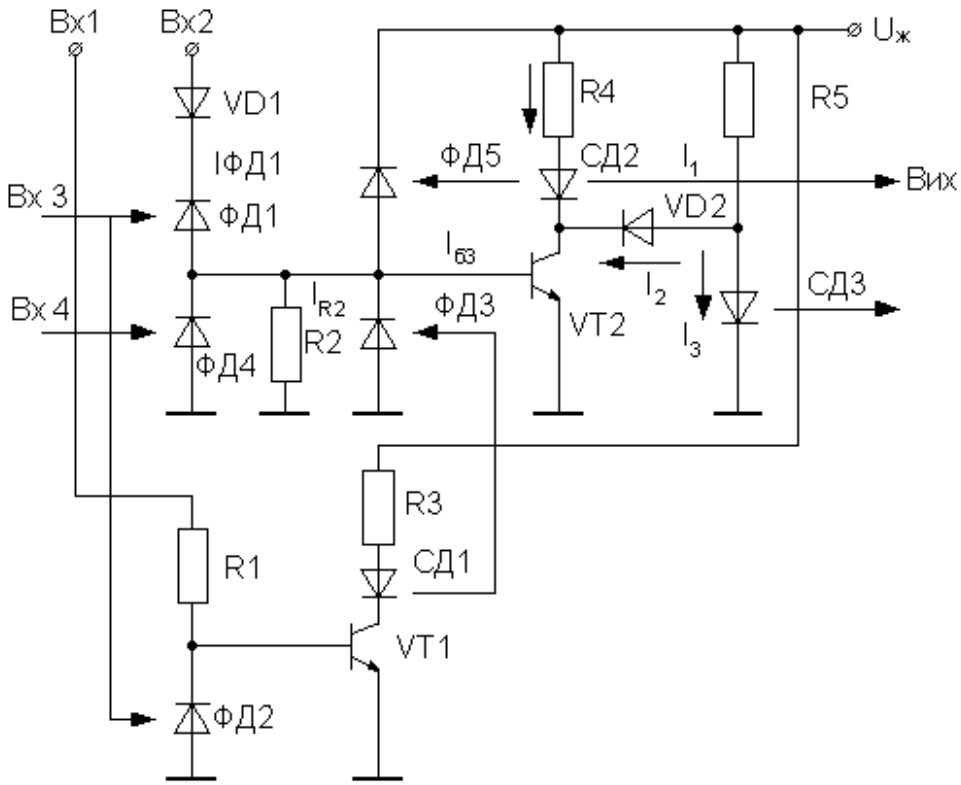



Рисунок 5.7 – Елемент індикації з пам’яттю

У режимі *D*-тригера при подачі на входи Вх1 та Вх2 керуючих сигналів позитивної полярності і на одиничний оптичний вхід Вх3 світлового потоку крізь фотодіоди ФД1 і ФД2 починає протікати порівняно великий фотострум. У результаті транзистор VT1 виявляється замкненим, а світлодіод СД1 – незасвіченим. Таким чином, зворотний оптичний зв’язок світлодіод СД1 – фотодіод ФД3 буде розімкнутим. При цьому сигнал керування з Вх2 надходить через відкритий діод Д1 та фотодіод ФД1 на базу транзистора VT2, відмикаючи його. Виникає позитивний оптичний зв’язок. При цьому повинна виконуватися умова

$$R_2 >> R_{ФД4},$$

де $R_{ФД4}$ - опір фотодіода ФД4.

При незасвіченому фотодіоді ФД4

$$R_2 = \frac{U_{BX2} - U_{VD1} - U_{ФД1}}{I_{ФД1}},$$

де $U_{BX2}$ - напруга на вході Вх2;

$U_{Д1}$ - спад напруги на діоді Д1;

$U_{ФД1}$ -спад напруги на засвіченому фотодіоді ФД1;

$I_{ФД1}$ - струм, що протікає через фотодіод ФД1.

Спрацьовує позитивний оптичний зв'язок, транзистор VT2 знаходиться у відкритому стані, і на прямому оптичному виході Вих1 з'являється світловий сигнал, який свідчить про те, що елемент знаходиться в одиничному збудженому стані.

$$R_4 = \frac{U_Ж - U_{СД2} - U_{VT2}}{I_{СД2}},$$

де $U_Ж$ – напруга живлення;

$U_{СД2}$ – спад напруги на світлодіоді СД2;

$U_{VT2}$ – спад напруги на транзисторі VT2.

При відкритому транзисторі VT2

$$R_5 = \frac{U_Ж - U_{VD2} - U_{VT2}}{I_{VD2}},$$

де – $U_{VD2}$ спад напруги на діоді VD2;

$I_{VD2}$ – струм, що протікає через діод VD2.

Оптичний вхід Вх3 у даному випадку є D-входом. При подачі на входи Вх1 і Вх2 потенціалів позитивної полярності і відсутності на D-вході світлового сигналу транзистор VT1 відмикається, оскільки світловий сигнал на оптичному вході ФД2 відсутній. При цьому світлодіод СД1 збуджується, спрацьовує оптичний зворотний зв'язок світлодіод СД1 – фотодіод ФДЗ, і на базу транзистора VT2 надходить нульовий потенціал, замикаючи його. На інверсному виході Вих2 з'являється оптичний сигнал, який свідчить про те, що елемент знаходиться

в нульовому – збудженому стані.

При закритому транзисторі VT2

$$R_5 = \frac{U_{Ж} - U_{СД3}}{I_{СД3}},$$

де $U_{СД3}$ – спад напруги на світлодіоді СДЗ;

$I_{СД3}$ – струм, що протікає через світлодіод СДЗ.

Резисторами $R_1$ та $R_2$ досягається потрібний режим роботи VT1 і VT2. Зокрема, резистор $R_2$ забезпечує подачу зміщеного рівня нульового потенціалу на базу VT2, що приводить до його часткового закривання.

При відкритому транзисторі VT1

$$R_1 = \frac{U_{BX} - U_{ВІДVT1}}{I_{ФД2}},$$

де $U_{ВІД\ VT1}$ – спад напруги на відкритому транзисторі VT1;

$I_{ФД2}$ – струм, що протікає через відкритий фотодіод ФД2.

Для нормальної роботи елемента індикації необхідне виконання умови

$$I_{БVT2} \geq 10 I_{R2}$$

де $I_{БVT2}$ – базовий струм транзитора VT2;

$I_{R2}$ – струм, що тече через резистор $R_2$.

Тоді

$$I_{ФD1} = I_{R2} + I_{БVT};$$
$$I_{ФD1} = I_{R2} + 10 I_{R2} = 11 I_{R2}.$$

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{11 I_{R2}} = 11 \frac{U_{R2}}{I_{ФD1}};$$
$$R_2 = 11 \frac{(U_{BX2} - U_{VD1} - U_{ФД1})}{I_{ФD1}}.$$

Діод VD1 є роз’язувальним і забезпечує потрібний режим роботи при

подачі на Вх1 і Вх2 нульових потенціалів.

Використання елемента індикації в режимі D-тригера, сприяє побудові однорідних інформаційно-обчислювальних структур, що дозволяють простими засобами робити обробку та індикацію інформації.

На рис. 5.8 показаний приклад елемента індикації на двокольорових світлодіодах.

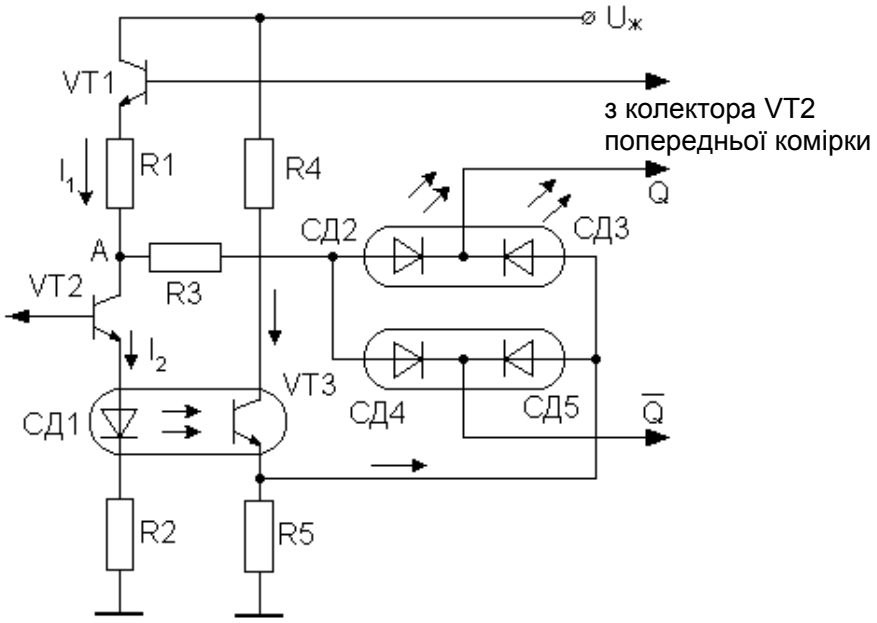



Рисунок 5.8 – Елемент індикації на двокольорових світлодіодах

При відсутності вхідного сигналу на базу транзистора VT2 подається потенціал, при якому транзистор знаходиться у відкритому стані. При цьому

$$R_1 = \frac{U_Ж - U_{VT1} - U_{VT2} - U_{СД1}}{I_{СД1}}.$$

Резистори $R_2$ і $R_3$ обрані таким чином, що $I_2 > I_3$, а $I_2 + I_3 < 20$ *мА*.

У цьому режимі сила струму $I_3$ є недостатньою для вмикання світлодіода СД2, а струму $I_2$ є достатньою для вмикання СД1. Отже, світлодіод СД3 буде випромінювати червоний колір. Зі збільшенням вхідного сигналу $U_{BX}$ потенціал бази транзистора VT2 зменшується, і транзистор VT2 закривається. При цьому опір резистора $R_2$ повинен задовольняти умову

$$R_2 = \frac{U_Ж - U_{VT1} - U_{R1} - U_{СД2} - U_0}{I_{СД2}}.$$

Струм між світлодіодами СД2 і СДЗ перерозподіляється так, що колір їхнього світіння змінюється від червоного до зеленого. При відповідному перемішуванні кольорів можна одержати жовтий і жовтогарячий кольори. Резистори $R_4$ і $R_5$ обрані таким чином, що

$$R_4 = \frac{U_Ж - U_0 - U_{СД3} - U_{VT3}}{I_{R4}},$$

$$R_5 = \frac{U_0 + U_{СД3}}{I_{R5}}.$$

Аналогічні процеси відбуваються при нульовому рівні сигналу на об’єднаних виводах світлодіодів СД4, СД5. Послідовне вмикання елементів індикації дозволяє організувати двокольоровий режим гістограмно-позиційного подання інформації.

З викладеного випливає, що квантрон – багатофункціональний елемент аналого-цифрового типу із зовнішньою індикацією станів. Наявність керованих оптичних інформаційних входів і оптичного виходу забезпечує гальванічну розв’язку та спрощує організацію міжрозрядних зв’язків.

Схемотехнічно квантрон є простішим за електронний статичний елемент пам’яті. У квантрона пам’ять організована одним зворотним оптичним зв'язком при використанні тільки одного транзистора в схемі. За споживаною потужністю квантрон є економічнішим, ніж потенційні тригери, оскільки у нульовому стані квантрон практично не споживає енергію. За швидкодією квантрон не поступається елементам пам’яті, побудованим на елементах ТТЛ серії.

Зазначені характеристики квантрона свідчать про перспективність його застосування як елементної бази оптоелектронних засобів обчислювальної техніки, у якій елементи відображення інформації функціонально інтегровані з логічною її частиною.

## 5.3 Схемотехніка оптоелекронних функціональних перетворювачів

Оптоелектронні перетворювачі з кожним роком знаходять усе більше застосування в інформаційно-вимірювальних і обчислювальних системах нового покоління. У порівнянні зі звичайними перетворювачами вони мають ряд принципових особливостей, основними з яких є: різноманітність функцій перетворення (як методичних, так і схемотехнічних); можливість оптимального стикування з великою кількістю зовнішніх (первинних) об'єктів; високі показники точності, швидкодії і надійності перетворення; простота конструкції, незначні вартісні показники та ін.

Особливості функціонування оптоелектронних перетворювачів в технічних пристроях сучасної радіоелектроніки визначають специфіку пропонованих до них схемотехнічних і системотехнічних вимог.

Ці особливості, безумовно, повинні бути враховані при синтезі багато-функціональних оптоелектронних модулів, при проектуванні оптоелектронних перерахункових схем, суматорів, АЦП і ЦАП, операційних табло, ітераторів і інших оптоелектронних функціональних схем як загального, так і спеціального призначення.

### 5.3.1 Кодування інформації в оптоелектронних функціональних перетворювачах

Порівняно низька завадозахищеність електронних перетворювачів, а також пристроїв обробки інформації на їхній основі, обумовлена однаковою природою носія сигналів - електрона та керуючого середовища - електричного поля. Освоєння оптичного діапазону в технічних системах розширює частотний діапазон керуючих сигналів до $10^{14}...10^{15}$ Гц з одночасним збільшенням інформаційної ємності приблизно в $10^6$ раз. Проблеми надійного зв'язку в сучасній мікроелектроніці можуть бути значною мірою вирішені, якщо перетворення сигналу здійснюється фотонами. При цьому фотоелектричному перетворенню властивий великий ступінь універсальності.

В наш час інтенсивно розвивається кілька напрямків використання елементів оптоелектроніки для перетворення й обробки інформації

Оптоелектронні функціональні перетворювачі інформаційно-вимірювальних і обчислювальних структур розділяються на два основних класи: дискретні й аналогові, де застосовуються оптоелектронні некогерентні і когерентні принципи і засоби перетворення дискретних або аналогових сигналів, відповідно.

Оптоелектронні некогерентні елементи у функціональних перетворювачах в основному служать бістабільними приладами, що здійснюють як активні функції, наприклад функції перемикання (перехід вихідного світлодіода оптронів у стан збудження або навпаки), так і пасивні, наприклад функції гальванічної розв'язки при з'єднанні елементів функціональних схем.

Оптоелектронні когерентні оптичні пристрої в основному працюють на використанні ефекту гасіння генерації напівпровідникового лазера світлом іншого лазера. При цьому досягається величезна швидкодія логічних і запам'ятовувальних оптичних елементів. Однак складність керування променем лазера, великі габарити юстувальних установок, їхня критичність до вібрацій, значна споживана потужність лазерів при сучасному рівні технології обмежують створення і масове використання когерентних оптичних обчислювальних машин.

Великий інтерес викликають аналогові системи, в яких головною задачею є перетворення й обробка зображень. У цих системах також використовується когерентне випромінювання світла. Синтез зображень виконується з використанням транспарантів, систем типу "секвентивних фільтрів", матричних сканісторних систем. Крім обмежень, внесених складністю лазерної установки, практичне використання аналогових систем стримується тим, що ще технічно не створені електрично і оптично керовані транспаранти з прийнятними характеристиками.

Досить актуальне питання стикування оптичної пам'яті з функціональними пристроями оптоелектронної схемотехніки. Тут виникає необхідність у застосуванні оптоелектронних функціональних перетворювачів.

При організації оптичної пам'яті великі успіхи досягнуті в створенні довгострокових голографічних постійних запам'ятовувальних пристроїв з великою щільністю запису інформації (до $10^{12}$ біт/см$^2$) і високою

надійністю. Час вибірки числа складає одиниці мікросекунд, у $10^4$ -$10^5$ раз менший, ніж у системах на магнітних дисках. Однак створення оперативної оптоелектронної пам'яті (когерентного типу) стримується відсутністю надійних реверсивних оптичних середовищ.

Оптичні системи можуть застосовуватися також у пристроях введення-виведення. Вони відрізняються досить високою швидкодією ($10^8$...$10^9$ біт/с). Наприклад, голографічні пристрої введення „*Holotablet”* мають швидкість $10^4$ сторінок/с. Ці пристрої використовують принцип безпосереднього введення символів оператором за допомогою ручки, зв'язаної пантографом з лазером, що повторює запис на голографічній пластинці. Перетворення сигналів у цифровий код відбувається за допомогою матриці кремнієвих фотодіодів. Існують у наш час пристрої, у яких через фотоматрицю за допомогою дефлектора або матриці лазерів вводяться з носія, що рухається, у пам'ять машини дані зі швидкістю $10^7$ біт/с.

В оптоелектронних перетворювачах можна успішно застосовувати новий клас систем - оптронні системи з оптичним зв'язком. Оптичні зв'язки в основному здійснюються скловолоконними лініями. Волоконний зв'язок ефективно застосовується для передачі інформації між ЕОМ, її блоками та усередині блоків (міжвузловий волоконний зв'язок). Для цього вкрай важливі такі переваги оптичного зв'язку, як широкосмужність, гальванічна розв'язка входу і виходу, односпрямованість, відсутність "коротких замикань", надійність, різке зменшення маси кабелів у порівнянні з мідними проводами (на порядок), незначна вартість (заміна міді дешевим склом) і нечутливість до електричних перешкод.

Сфера застосування оптронів некогерентної схемотехніки досить широка. У зв'язку з унікальними особливостями, більшість з них спрямована на забезпечення електричної розв'язки силових кіл від слабкострумових керуючих сигналів.

Значне місце серед оптоелектронних функціональних перетворювачів займають перетворювачі, робота яких основана на застосуванні принципу квантування часу світловим променем. Цей принцип дозволяє по-новому, більш ефективно вирішувати багато задач на основі оптоелектронної схемотехніки. Характер принципу квантування часу впливає на способи кодування інформації в оптоелектронних функціональних перетворювачах.

Принцип квантування часу полягає в перетворенні часового інтервалу кількістю, спрацювавших послідовно один за одним з однаковим часом перемикання, дискретних оптоелектронних елементів – квантронів, при подачі на них сигналу про початок перетворення. Таким чином, тривалість часового інтервалу, що фіксується часом дії вхідного сигналу, перетвориться в цифровий код, що відповідає кількості збуджених за цей час елементів перетворювача.

Зазначений спосіб квантування часу є основою для подання даних в оптоелектронних функціональних перетворювачах. Він дозволяє створити такий універсальний багатофункціональний модуль, застосування якого сприяє реалізації як аналого-цифрових перетворювачів, так і однорідних обчислювальних середовищ із пристроями введення, обробки і виведення інформації, де дані, що знімаються з датчиків в аналоговій формі, обробляються в дискретних пристроях, а результати подаються за допомогою прямої індикації в десятковому вигляді.

Ефективність систем числення у функціональних перетворювачах оцінюється з урахуванням таких факторів:

1) складності алгоритмів перетворення при прийомі даних і видачі результатів;

2) зручності для безпосереднього читання й оцінки модуля числа його знака;

3) складності подання чисел у залежності від використовуваної системи елементів;

4) складності і швидкодії пристроїв виконання арифметичних і інших типових машинних операцій над числами.

Поширення двійкової системи числення пов'язано з її загальновідомими перевагами при виконанні операцій додавання, легкості подання двох стійких станів для відображення цифр 0 і 1 в одному розряді двійкового числа.

Необхідність подання даних у вигляді десяткових чисел визначається передбачуваною областю використання, пов'язаною з виконанням задач попередньої обробки даних з безпосередньою візуалізацією результатів у звичній для користувача формі. Оскільки в задачах обробки даних на одне введене-виведене число приходиться відносно невелика кількість

арифметичних операцій, переведення чисел при введенні та виведенні з однієї системи в іншу є недоцільним.

Основними критеріями для вибору системи числення можуть бути складність алгоритмів перетворення при введенні-виведенні і зручність безпосереднього читання інформації. Оцінимо, яка система числення є більш оптимальною за першим критерієм.

Кодування цифр визначає спосіб взаємооднозначної відповідності між можливими значеннями цифр і станами фізичних систем (звичайно елементів пам'яті), використовуваних для відображення цифр цих чисел.

У випадку подання числа $A$ в системі числення з основою $r$, де будь-яка цифра $a_i$ приймає значення 0, 1, 2,..., $r$ -1, кодування цифр зводиться до однозначного визначення відповідності

$$a_i = F[f(\alpha_j)], \tag{5.2}$$

де $f$ та $F$ - функції кодування, що визначають відповідно правила кодування $r$ значень $a_i$ станами окремого елемента пам'яті.

Кількість $n$ елементів пам'яті з $m$ станами, яка необхідна для подання цифри $a_i$ , що має $r$ значень, визначається з виразу

$$\begin{aligned} n_{\max} &= r \\ n_{\min} &= [\log_m r] \end{aligned} \tag{5.3}$$

де $n_{min}$, $n_{max}$, - ціле число, причому $log_m r \le n_{min} \le (log_m r) - 1$.

Використання елементів пам'яті з двома стійкими станами обумовлює оптимальним використання двійкової системи числення. Елементарно виконується кодування в двійковому алфавіті систем числення з основою $r = 2^l$, где $l$ =2, 3, ... . Ці системи можна розглядати як похідні двійкової системи числення, що включають відповідно по 2, 3 і т.д. двійкових розрядів.

Складність виникає при кодуванні в системах числення з іншими основами, наприклад при $r$ = 10. У цьому випадку $n_{min}$ = 4, а $n_{max}$ = 10.

Якщо для кодування цифр використовується $n$ двійкових елементів, то всього для системи числення з основою $r$ існує $2^n\ n!\ (2^n - r)!$ можливих

способів кодування цифр, кожний з яких характеризується матрицею вигляду [r, n]:

$$D_r^n = \begin{vmatrix} \alpha_{0,0}.....\alpha_{0,j}.....\alpha_{0,n-1} \\ \alpha_{r-1,0}....\alpha_{r-1,j}....\alpha_{r-1,n-1} \end{vmatrix} \qquad (5.4)$$

де $\alpha_{ij} \in \{0, 1\}$.

Матриця утворюється шляхом зіставлення кожного можливого значення цифри $a_i$ з різними наборами $q(\alpha)$ двійкових кодів фіксованої довжини n .

Особливий підклас *D*-кодів являють собою комплементарні коди, що забезпечують одержання зворотного коду цифри простим інвертуванням одного або декількох двійкових розрядів набору $q(\alpha)$. Необхідність у таких кодах викликана вимогою заміни операції віднімання операцією додавання, що виконується у зворотному і додатковому кодах.

Серед *D*-кодів тільки порівняно невелика частина має властивість, що кожному рядку матриці (5.4) можна присвоювати цілі значення (ваги) $\varphi_i$ так, що кожне значення цифри можна зобразити у вигляді

$$\alpha_i = \sum_{j=0}^{n-1} \alpha_{i,j} \cdot \varphi_j$$

Такі коди зручні для оцінки їхніх значень і просто реалізуються в обчислювальних схемах.

Таким чином, із усієї безлічі D-кодів особливий інтерес для відображення числової інформації викликає підмножина *D*-кодів з постійними вагами розрядів, що мають властивості комплементарності, тобто коди, для яких виконуються умови.

$$\alpha_i = q(\alpha) = \sum_{j=0}^{n-1} \alpha_{i,j} \cdot \varphi_j \pm h \qquad (5.5);$$

$$\psi(\alpha_i) + \psi(r-1-\alpha_i) = r-1 \qquad (5.6),$$

де $h \geq 0$ - ціле число, назване надлишком або нестачею;

$\alpha_{ij}$ - значення $j$ -го розряду $i$ -й цифри;

$\varphi_i$ - вага j -го розряду;

$\psi(a_i)$, $\psi(r\text{-}1\text{-}a_i)$ - значення відповідно прямого і зворотного кодів для будь-якого значення цифри $a_i$.

Економічність подання цифр за допомогою елементів пам'яті зі стійкими станами можна розглядати як процентне співвідношення

$$Y = P_н \big/ P_{\max} = r \big/ m^{n_{\min}} ,$$

де $P_н$ - кількість необхідних станів елементів пам'яті;

$P_{max}$ - максимальна кількість можливих станів.

Розглядаючи його при $m = 2$, для систем числення з основами $r = 2$, $r = 3$, $r = 10$ отримаємо, відповідно $Y_2 = 100\%$, $Y_3 = 75\%$, $Y_{10} = 62{,}5\%$. Тому в системах числення з основою $r > 2$ бажано застосовувати елементи пам'яті з числом станів, рівним основі системи числення $r$.

Таким чином, для відображення десяткової цифри необхідна наявність елемента пам'яті з десятьма стійкими станами або десяти бістабільних елементів (наприклад, електронних тригерів або оптоелектронних квантронів).

При використанні максимальної кількості двійкових елементів пам'яті $n_{max} = 10$ для відображення десяткових цифр, матриця (5.4) прийме вигляд

$$D_{\substack{1\ 0\\1\ 0}} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \qquad (5.7)$$

де рядки зображають відповідні коди десяткових цифр $a_i \in \{0, 9\}$, а стовпці узгоджуються з розрядами j = 0...9 кожного коду відповідної цифри. При

розгляданні кодів цифр у матриці (5.7), починаючи з 1-го до 9-го розряду, можна визначити вісь симетрії, що проходить по діагоналі матриці. Таким чином, наведений спосіб кодування має властивості комплементарності, оскільки додатковий до дев'яти код можна одержати, якщо проінвертувати усі розряди прямого коду і розряди додаткового коду нумерувати в зворотному порядку відносно розрядів прямого коду. Наведений комплементарний код має властивість лінійності, тому що для нього виконується умова $a_i < a_{i+1} \rightarrow \psi(a_i) < \psi(a_{i+1})$.

Спосіб кодування, зображений матрицею (5.7), є одиничним кодуванням, суть якого полягає в тому, що цифра визначається місцезнаходженням певного коду таким чином, що при сусідніх місцях розташування цифр їхні коди відрізняються на одиницю. Отже, для одиничного коду виконується умова

$$\alpha_i = \sum_{j=0}^{r-1} \alpha_{i,j} \cdot \varphi_j \qquad (5.8)$$

де $\alpha_{ij} \in \{0, 1\}$, r=10,

$$\varphi_j = \begin{cases} 1 & при\ j > 0 \\ 0 & при\ j = 0 \end{cases}.$$

Одиничний код є надлишковим позиційним кодом з постійними вагами розрядів. Ваги розрядів одиничного коду, починаючи з 1-го по 9-й, являють собою одиничний числовий ряд: 1,1,...,1.. є (r-1).

Оскільки одиничний ряд, поряд з двійковим числовим рядом $2^l$ ($l$ = 0,1,...), поруч з класичним рядом Фібоначчі і натуральним рядом чисел складає ряди $p$-чисел Фібоначчі, то одиничний код можна вважати окремим випадком узагальнених $p$-кодів Фібоначчі при $p = \infty$. Особливістю одиничного коду є те, що будь-яка цифра $a_i$ відображається послідовністю одиниць, починаючи з 1-го і до $n$-го розряду $\{n \in [0,1,..., r-1]\}$, сума яких визначає значення відповідної цифри. Отже, правило кодування для даного способу можна зобразити у такому вигляді:

$$\alpha_i = \sum_{j=0}^{r-1} \alpha_{i,j} \cdot \varphi_j = \sum_{j=0}^{n} \alpha^1{}_{i,j} \cdot \varphi_j + \sum_{j=n+1}^{r-1} \alpha^0{}_{i,j} \cdot \varphi_j \qquad (5.9)$$

де $\alpha^1_{ij} = 1$, $\alpha^0_{ij} = 0$

*n* - *n*-й розряд в одиничному поданні цифри, що відповідає числовому значенню даної цифри $a_i$.

Будь-яке натуральне число можна зобразити за допомогою цілих невід'ємних чисел у системі р - чисел Фібоначчі. Виходить, будь-яку десяткову цифру $a_i$, що входить у натуральний ряд чисел 0, 1, 2, …., можна зобразити в будь-якому *P*-коді Фібоначчі за допомогою цілих ненегативних чисел *n* та *h* таких, що виконуються співвідношення

$$a_i = \varphi_n + h, \qquad 0 \le h \le 1, \tag{5.10}$$

де $\varphi_n = n$ при n є {0,1, ….r-1}.

Вираз (5.10) є рекурентним співвідношенням, що породжує натуральний ряд чисел 0,1,2,.... Таким чином, у результаті отримаємо вираз

$$\alpha_i = \sum_{j=0}^{n} \alpha^1_{i,j} \cdot \varphi_j = \alpha_i \sum_{j=0}^{n} \varphi_j = \alpha_i \cdot \varphi_n \ , \tag{5.11}$$

де $\alpha_i$ - одиничний маркер, $\alpha_i = I$;

$\varphi_n$ - вага *n*-го розряду одиничного позиційного коду.

Вираз вигляду

$$\varphi_n = \sum_{j=0}^{n} \varphi_j \tag{5.12}$$

називається формулою згортки за аналогією з подібною операцією в двійковій системі числення, оскільки в результаті даної операції в одиничних кодах послідовність з n одиниць замінюється одиничним маркером у n - й позиції кодової комбінації цифри $a_i$. Назвемо код, у якому ваги розрядів зображають натуральний ряд чисел 0, 1, 2, ... , одиничним позиційним кодом на відміну від одиничного нормального коду, ваги розрядів якого визначаються виразом (5.8). Таким чином, перехід від подання десяткових цифр в одиничному нормальному коді до одиничного позиційного коду виконується з

використанням співвідношення (5.12).

Матриця кодування десяткових цифр в одиничному позиційному коді має такий вигляд:

$$D_{10}^{10}(n)=\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \qquad (5.13)$$

З матриці (5.13) видно, що при одиничному позиційному кодуванні десяткових цифр використовується позиційний принцип подання цифр. Традиційно застосовуваним в ЕОМ є двійкове позиційне числення, в якому цифра нуль подається як відсутність сигналу, а одиниця – присутність. Нове подання двійкових цифр в ЕОМ повинно задовольняти основну вимогу - бути незалежним для нуля й одиниці. Відповідно до цього обидві двійкові цифри одного розряду повинні бути зображені символом, значення якого визначається номером позиції усередині розряду, у якій цей символ у даний момент знаходиться. Оскільки позиційне числення має контролездатність, то і позиційне подання його цифр має ту ж контролездатність з тією ж ознакою правильного запису цифр: в одному розряді повинно бути записано не менше і не більше одного цифрового сигналу. Аналогічно для позиційного подання цифр із основою $r > 2$ необхідна наявність єдиного символу і $r$ позицій.

Одним із прикладів структурної реалізації розглянутих видів одиничного кодування є подання числової інформації в логіко-часових обчислювальних середовищах з використанням принципу квантування часу. Тут інформаційним параметром виступає часовий квант, інваріантний до елементної бази.

Найбільш прийнятним кодом подання інформації, заданої у вигляді тривалості часового інтервалу, в однорідному обчислювальному середовищі, в основі якого лежать багатовимірні зсувові структури, є

одиничний код. Як було розглянуто вище, існує два різновиди одиничного коду: одиничний нормальний код, який визначений як код часу нормальний (КЧН), і одиничний позиційний код, або код часу позиційний (КЧП).

Відповідно до основних критеріїв, таких як швидкодія, енергоємність і завадостійкість, принцип запису з використанням КЧН виявляється найбільш швидкодіючим, а з використанням КЧП - найменш енергоємним. Існує комбінований підхід до кодування, тобто запропонований код для подання інформації в однорідному середовищі. Цей код отримав назву логіко-часового коду (ЛЧК). Логіко-часовий код використовує код КЧН при записі інформації, а код КЧП - для збереження записаної інформації. У результаті, логіко-часовий код є проблемно орієнтованим на досягнення максимально можливої схемотехнічної швидкодії при записі машинної інформації і мінімально можливої споживаної потужності при її збереженні.

Для наочності розглянемо приклад відображення десяткової інформації в однорідному обчислювальному середовищі зазначеним способом. Для подання десяткової цифри за допомогою логіко-часового коду необхідна наявність лінійки з десяти послідовно з'єднаних квантронів. Приклад зображення десяткової цифри 7 за допомогою модуля в часовому і просторовому відношенні показаний на рисунку 5.9.

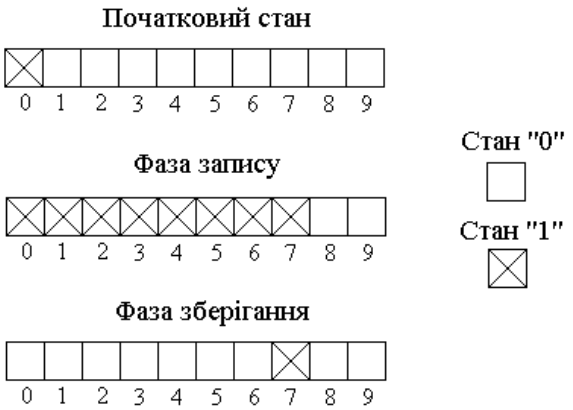



Рисунок 5.9 – Приклад відображення цифри 7 за допомогою оптоелектронного модуля

Квантрон, що знаходиться у нульовому розряді лінійки, вказує на ознаку роботи модуля. Число в діапазоні +1...+9 зображається в лінійці

(модулі) послідовністю з відповідної кількості одиниць, що починаються зліва. Число в діапазоні -1...-9 зображається в лінійці послідовністю з відповідної кількості одиниць, що починаються справа.. Число "0" подається відсутністю одиниць.

В однорідному середовищі за допомогою десяткових чисел можливе також відображення нечислової інформації, до якої відноситься символьна і графічна. При цьому необхідно відзначити, що використовуване в даному випадку кодування інформації також є логіко-часовим. Графічна і символьна інформації подаються на однорідному середовищі з довільним розташуванням нулів і одиниць в обраному масштабі дискретизації.

### 5.3.2 Синтез багатофункціональних модулів на квантронах і приклади їх реалізації

*Означення 1.* Запис вхідної інформації, при якому здійснюється послідовне запам'ятовування інформації, називається "шторковим" принципом запису інформації.

Виведемо характеристичне рівняння квантрона (рис. 5.10). З цією метою складемо повну таблицю переходів (табл. 5.1) даного квантрона і карту мінтермів (рис. 5.11) для складання його характеристичного рівняння, що має такий вигляд:

$$Q^{t+1} = Q^t + Tx_1 \qquad (5.14)$$

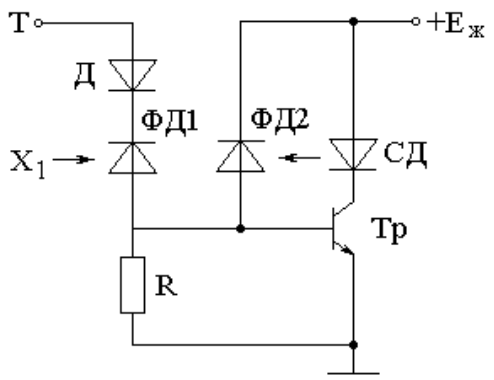



Рисунок 5.10 – Квантрон модуля з "шторковим" принципом запису інформації

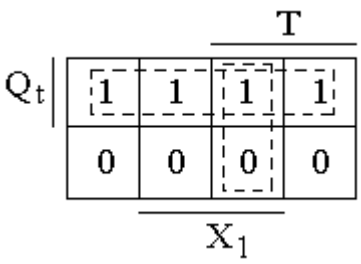



Рисунок 5.11 – Карта мінтермів квантрона модуля з "шторковим" принципом запису інформації

Таблиця 5.1- Повна таблиця переходів квантрона модуля з "шторковим" записом інформації

| $Q^t$ | T | $X_1$ | $Q^{t+1}$ | $f_q$ |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | α |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Згідно з (5.14) одиничний оптичний вхід $X_1$ даного квантрона керується за електричним входом T .

З метою пошуку рівнянь входів квантронів модуля складемо скорочену таблицю переходів (рис. 5.12), у якій враховуються переходи $Q^t \rightarrow Q^{t+1}$ тільки під впливом $X_1$.

| $Q^t$ | $X_1$ | $Q^{t+1}$ | $f_q$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | α |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

→

| $f_q$ | $X_1$ |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 1 | 0,1 |
| α | 1 |
| β | X |

→

| $f_q$ | $X_1$ |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 1 | X |
| α | 1 |
| β | X |

Рисунок 5.12 – Перетворення скороченої таблиці переходів у словник модуля зі "шторковим" записом інформації

Виходячи з означення "шторкового" принципу запису інформації подамо граф переходів трирозрядного модуля (рис. 5.13), за яким складемо таблицю описів (табл. 5.2) субсистеми оптоелектронного модуля зі "шторковим" принципом запису інформації. Деякі стани модуля, що не впливають на організацію принципів побудови модулів, не розглядаються. Для таких субсистем вони є невизначеними.

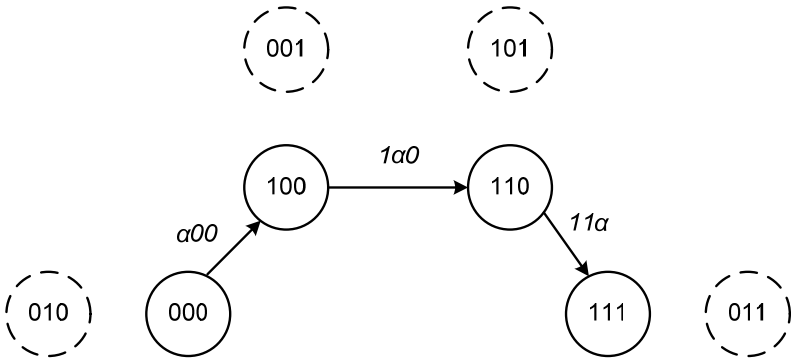



Рисунок 5.13 – Граф переходів субсистеми модуля зі "шторковим" принципом запису інформації

Таблиця 5.2 – Опис модуля зі "шторковим" записом інформації

| Номер стану | t | | | t + 1 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | A | B | C |
| 1 | 0 | 0 | 0 | $\alpha$ | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | $\alpha$ | 0 |
| 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | $\alpha$ |
| 4 | 1 | 1 | 1 | X | X | X |

Як випливає з табл. 5.2, у такий субсистемі при наявності часової інформації $T$ відбувається послідовний запис одиниці часової інформації в квантрони модуля за схемою A→B→C. Періоди функцій $A^{t+1}$, $B^{t+1}$, $C^{t+1}$ визначимо за допомогою занесення значень символів у клітинки діаграм Вейча (рис. 5.14) відповідно до словника (рис. 5.12).

Трансполяція діаграм Вейча (рис. 5.15) у рівняння входів квантрона зі "шторковим" принципом запису інформації приводить до виразу

$$(X_1)_A = X; \cdots\cdots\cdots (X_1)_B = A; \cdots\cdots\cdots (X_1)_C = B.$$

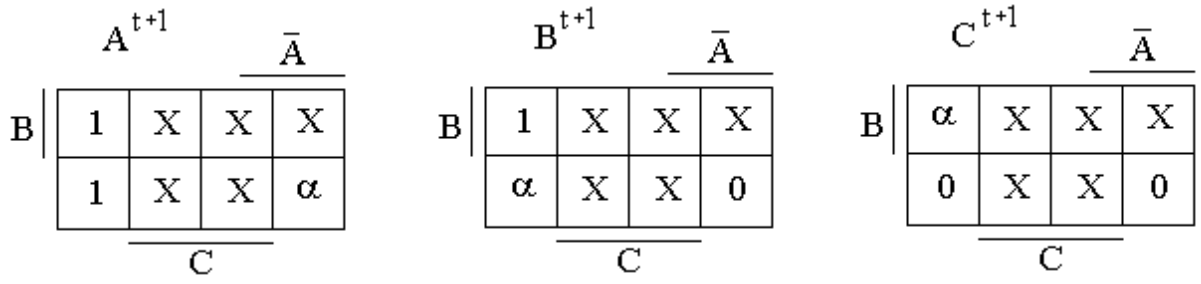



Рисунок 5.14 – Карти мінтермів станів квантронов модуля зі "шторковим" принципом запису інформації

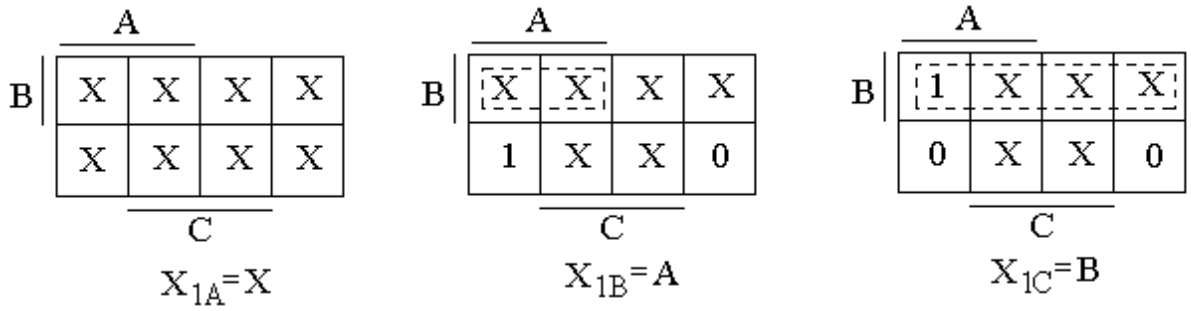



Рисунок 5.15 – Карти мінтермів функцій входів квантронів модуля зі "шторковим" принципом запису інформації

Поширення отриманих виразів на довільне число розрядів - квантронів дає можливість побудувати структурну схему оптоелектронного модуля зі "шторковим" принципом запису інформації (рис. 5.16).

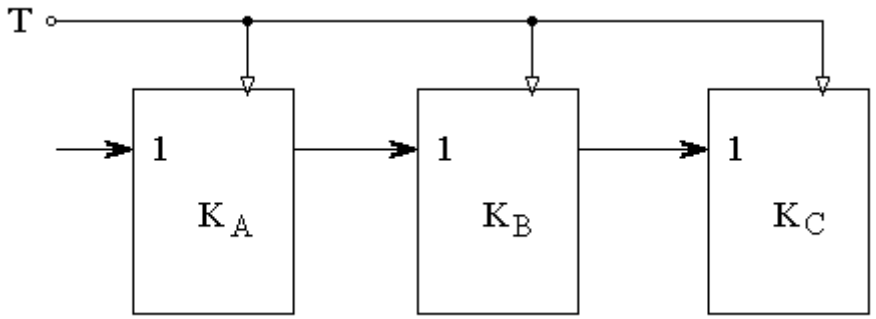



Рисунок 5.16 – Структурна схема модуля зі "шторковим" записом інформації

*Означення 2*. Запис вхідної інформації, при якій почергово здійснюється послідовне запам'ятовування інформації і її стирання називається "маркерним" принципом запису інформації.

Наведемо характеристичне рівняння квантрона (рис. 5.17) для нуля з "маркерним" принципом запису інформації.

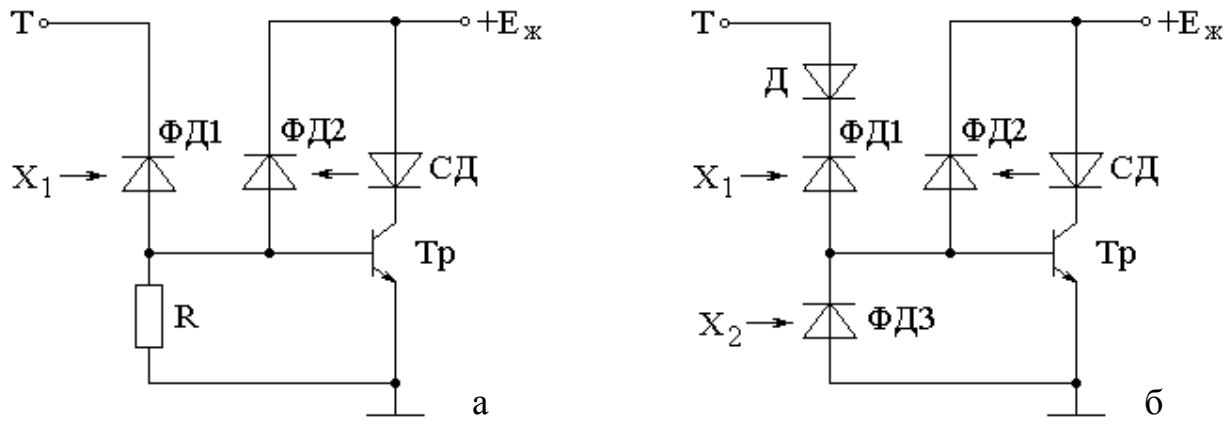



Рисунок 5.17 – Квантрони модуля з "маркерним" принципом запису інформації

Слід зазначити, що скидання квантрона може відбуватися електричними або оптичними сигналами. На рис. 5.17, а, б наведені дві функціональні схеми, що відповідають двом модифікаціям квантронів.

Таблиця 5.3 – Таблиця переходів квантрона з можливістю скидання електричним сигналом модуля з "маркерним" принципом запису інформації

| T | $Q^t$ | $X_1$ | $Q^{t+1}$ | $f_q$ |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | β |
| 0 | 1 | 1 | 0 | β |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | α |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Складемо таблиці переходів (табл. 5.3 і 5.4) даних модифікацій квантронів і карти мінтермів для характеристичного рівняння (рис. 5.18 і 5.19), а потім перетворимо їх у відповідні словники (рис. 5.20 і 5.21).

Таблиця 5.4 – Таблиця переходів квантрона з можливістю скидання оптичним сигналом модуля з "маркерним" принципом запису інформації

| T | $X_1$ | $X_2$ | $Q^t$ | $Q^{t+1}$ | $f_q$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | β |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | β |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | β |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | α |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | β |

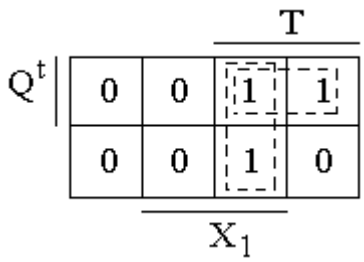



Рисунок 5.18– Карта мінтермів для характеристичного рівняння квантрона з можливістю скидання електричним сигналом модуля з "маркерним" принципом запису інформації

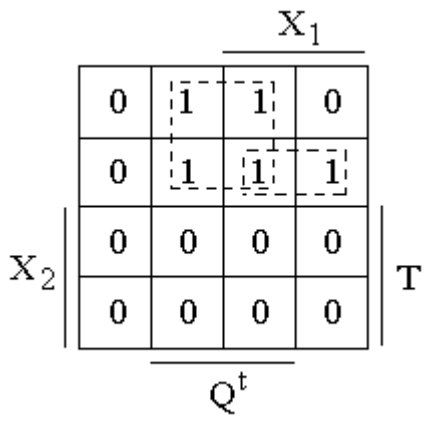



Рисунок 5.19 – Карта мінтермів для характеристичного рівняння квантрона з можливістю скидання оптичним сигналом модуля з "маркерним" принципом запису інформації

Переходи аргументу функції

T=0 →

| $f_q$ | T | $X_1$ |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,1 |
| 1 | - | - |
| α | - | - |
| β | 0 | 1 |

Словник 1

T=0 →

| $f_q$ | T | $X_1$ |
|---|---|---|
| 0 | 0 | X |
| 1 | - | - |
| α | - | - |
| β | 0 | 1 |

Переходи аргументу функції

T=1 →

| $f_q$ | T | $X_1$ |
|---|---|---|
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0,1 |
| α | 1 | 1 |
| β | - | - |

Словник 2

T=1 →

| $f_q$ | T | $X_1$ |
|---|---|---|
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | X |
| α | 1 | 1 |
| β | - | - |

Рисунко 5.20 – Переходи станів квантрона з можливістю скидання електричним сигналом модуля з "маркерним" принципом запису інформації та її перетворення в словник

Переходи аргументу функції

T=0 →

| $f_q$ | T | $X_1$ |
|---|---|---|
| 0 | 0,1 | 0,1 |
| 1 | 0,1 | 0 |
| α | - | - |
| β | 1 | 1 |

Словник 1

T=0 →

| $f_q$ | T | $X_1$ |
|---|---|---|
| 0 | X | X |
| 1 | X | 0 |
| α | - | - |
| β | X | 1 |

Переходи аргументу функції

T=1 →

| $f_q$ | $X_1$ | $X_2$ |
|---|---|---|
| 0 | 0,1 | 0,1 |
| 1 | 0,1 | 0 |
| α | 1 | 0 |
| β | 0,1 | 1 |

Словник 2

T=1 →

| $f_q$ | $X_1$ | $X_2$ |
|---|---|---|
| 0 | X | X |
| 1 | X | 0 |
| α | 1 | 0 |
| β | X | 1 |

Рисунок 5.21 – Переходи станів квантрона з можливістю скидання оптичним сигналом модуля з "маркерним" принципом запису інформації та її перетворення в словник

З карти мінтермів (рис. 5.18) характеристичне рівняння кванторна з можливістю скидання електричним сигналом має такий вигляд:

$$Q^{t+1} = T(Q^t + X_1). \qquad (5.15)$$

Як видно з (5.15), одиничний оптичний вхід квантрона керується сигналом на електричному вході *T,* а перехід квантрона в збуджений стан або його скидання залежить від рівня сигналу на вході *T*.

Виходячи з означення "маркерного" принципу запису інформації покажемо граф переходів трирозрядного модуля (рис. 5.22), за яким складемо таблицю описів (табл. 5.5) субсистеми модуля з "маркерним" принципом запису інформації.

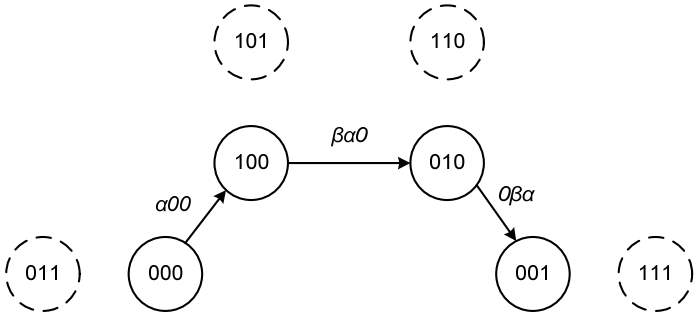



Рисунок 5.22 – Граф переходів субсистеми модуля з "маркерним" принципом запису інформації

Таблиця 5.5 – Опис модуля з "маркерним" записом інформації

| Номер стану | t | | | t + 1 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | A | B | C |
| 1 | 0 | 0 | 0 | α | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | β | α | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | β | α |
| 4 | 0 | 0 | 1 | X | X | X |

Аналогічно попередньому синтезові модуля періоди функцій $A^{t+1}$, $B^{t+1}$, $C^{t+1}$ визначимо за допомогою занесення значень різницевих символів у клітинки діаграми Вейча відповідно до словника (рис. 5.23)

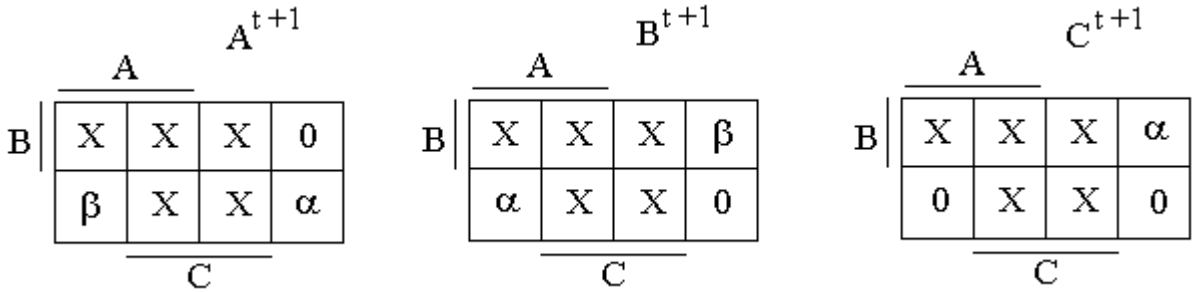



Рисунок 5.23 – Карти мінтермів станів квантрона з можливістю скидання електричним сигналом

Трансполяція діаграм Вейча (рис. 5.24) у рівняння входів квантрона з можливістю скидання електричним сигналом модуля з "маркерним" принципом запису інформації приводить до таких виразів:

$$T_A = I;\ T_B = I;\ T_C = I; \qquad (5.16)$$

$$(X_I)_A=B'; (X_I)_B=A; (X_I)_C=B. \qquad (5.17)$$

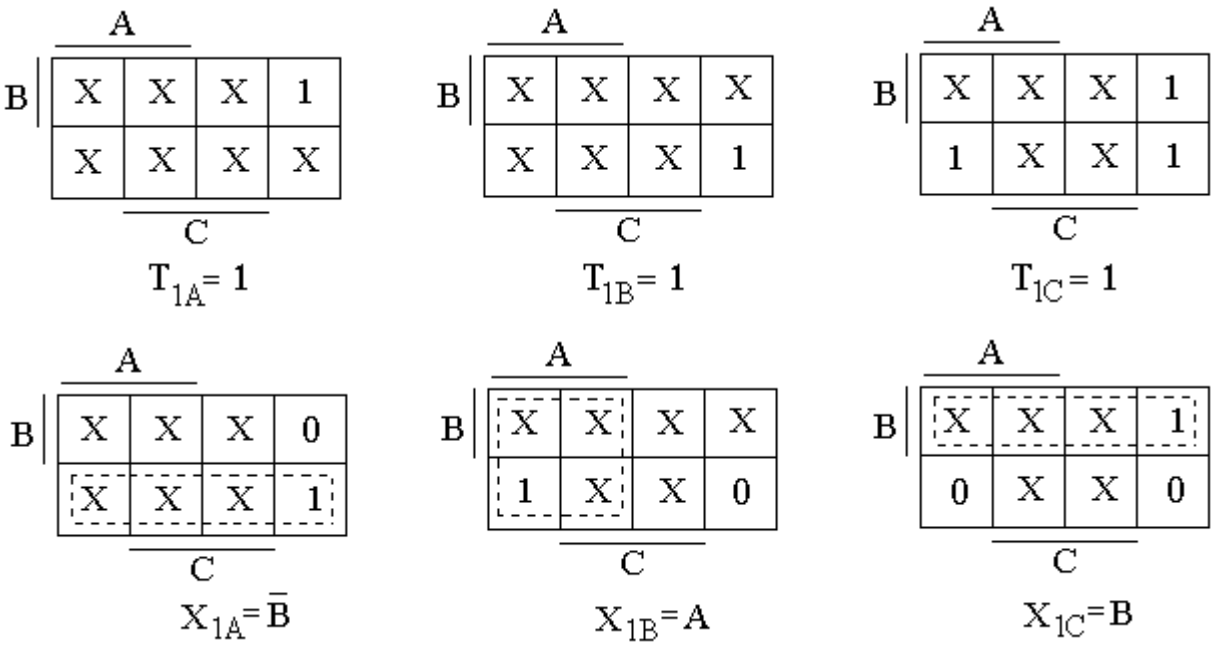



Рисунок 5.24 – Карти мінтермів функцій входів квантрона з можливістю скидання електричним сигналом модуля з "маркерним" принципом запису інформації

Вираз $(X_1)_A = \overline{B}$ означає, що спрацьовування розряду А відбувається за умови незбудженого розряду В. Іншими словами, розряд А переходить у збуджений стан тільки у випадку подачі на його одиничний оптичний вхід сигналу запуску.

Поширення отриманих виразів на довільне число розрядів-квантронів з можливістю їхнього скидання електричним сигналом приводить до побудови структурної схеми оптоелектронного модуля з "маркерним" принципом запису інформації (рис. 5.25).

Як випливає з карти мінтермів (див. рис. 5.19), характеристичне рівняння квантрона з можливістю скидання оптичним сигналом модуля з "маркерним" принципом запису інформації описується в такий спосіб**:**

$$Q^{t+1} = \overline{X}_2(Q + TX_1) \qquad (5.18)$$

З метою усунення помилок при синтезі схем модуля на квантронах

застосуємо поняття "несумісність" подій, що характеризується розбіжністю в часі сигналу на нульовому оптичному вході з тактовим сигналом. Тому табл. 5.4 переходів квантрона перетвориться в два словники: для сигналів при наявності і відсутності тактів.

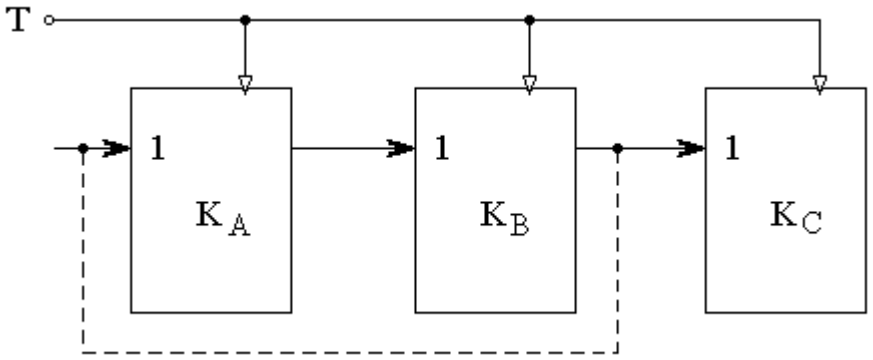



Рисунок 5.25 – Структурна схема оптоелектронного модуля з маркерним" принципом запису інформації

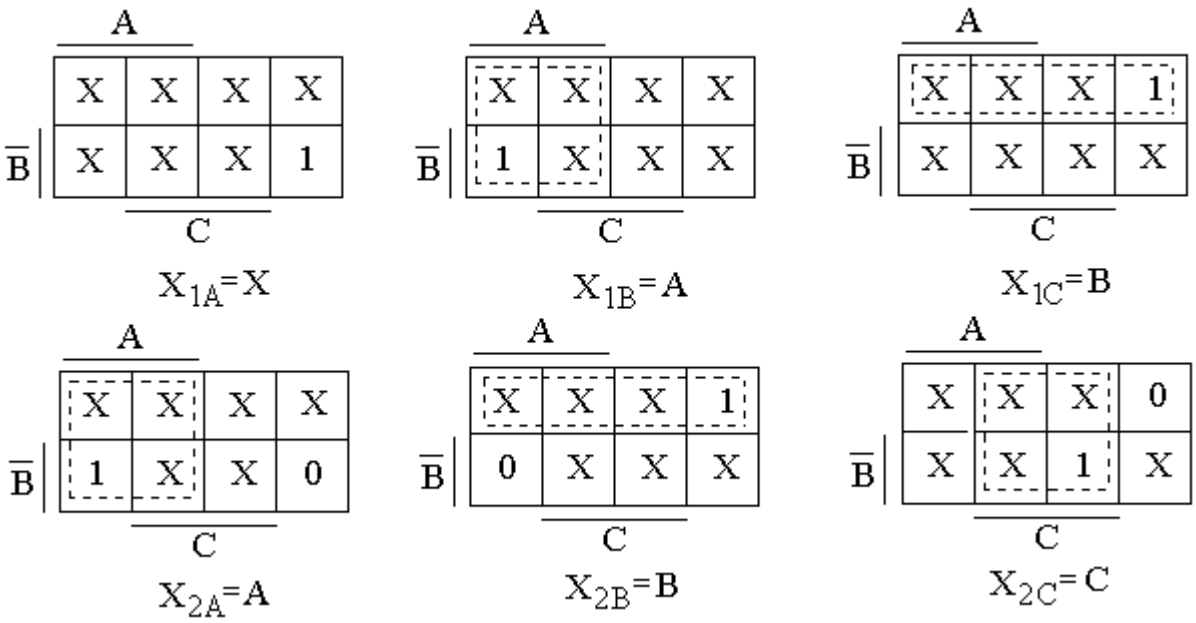



Рисунок 5.26 – Карти мінтермів функції входів квантрона з можливістю скидання оптичним сигналом модуля з "маркерним" принципом запису інформації

Трансполяція діаграм Вейча (рис. 5.26) у рівнянні входів квантрона з можливістю скидання оптичним сигналом модуля з "маркерним" принципом запису інформації приводить до таких виразів:

$$(X_I)_A=X;\ (X_I)_B=B;\ (X_I)_C=B; \qquad (5.19)$$

$$(X_2)_A=A;\ (X_2)_B=B;\ (X_2)_C=C. \qquad (5.20)$$

Перетворюючи вираз (5.20) для квантронів, для нульових оптичних входів знаходимо дійсні їхні значення;

$$(X_2)_A=X;\ (X_2)_B=A;\ (X_2)_C=B. \qquad (5.21)$$

Поширення отриманих виразів на довільне число розрядів-квантронів з можливістю їхнього скидання оптичним сигналом дозволяє побудувати структурну схему (рис. 5.27) модифікованого оптоелектронного модуля з "маркерним" принципом запису інформації.

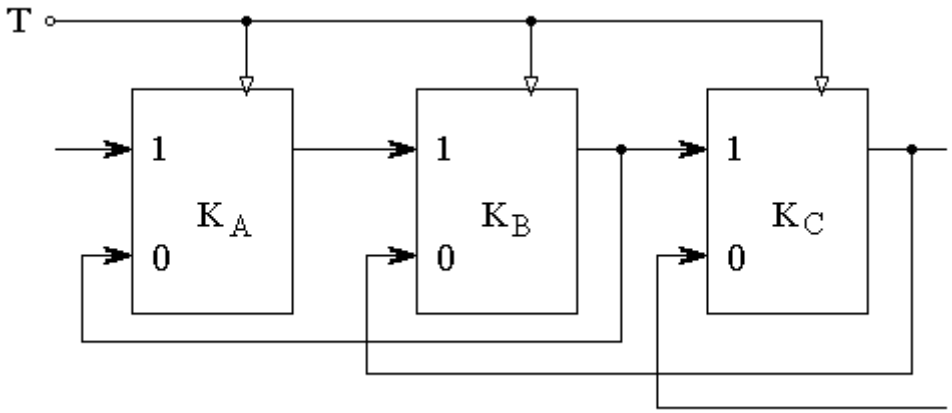



Рисунок 5.27 – Структурна схема модифікованого оптоелектронного модуля з "маркерним" принципом запису інформації

З графа переходів (див. рис. 5.13 і 5.22) модулів зі "шторковим" і "маркерним" принципами запису інформації виникає задача синтезу такої субсистеми, проміжні переходи якої аналогічні переходам квантронів модуля зі "шторковим" принципом запису, а кінцевий стан субсистеми відповідає кінцевому станові субсистеми модуля з "маркерним" принципом запису інформації.

*Означення 3*. Запис вхідної інформації, під час якої здійснюється послідовне її запам'ятовування, і після закінчення - одночасне скидання, крім останньої одиниці інформації, будемо називати "шторково-маркерним" принципом запису.

Схема квантрона зі "шторково-маркерним" принципом запису

інформації наведена на рисунку 5.28.

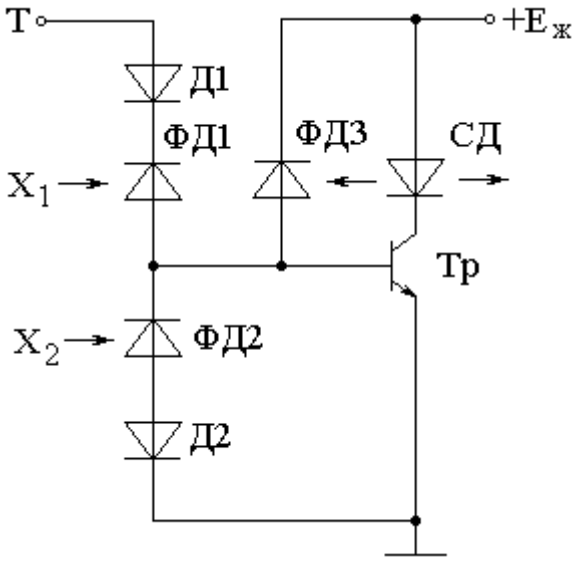



Рисунок 5.28 – Квантрон модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації

Таблиця 5.6 – Таблиця переходів квантрона зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації

| $Q^t$ | $T_1$ | $T_2$ | $X_1$ | $X_2$ | $Q^{t+1}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | X |

| $Q^t$ | $T_1$ | $T_2$ | $X_1$ | $X_2$ | $Q^{t+1}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | X |

Складемо для нього повну таблицю переходів (табл. 5.6) і карту мінтермів для його характеристичного рівняння (рис. 5.29).

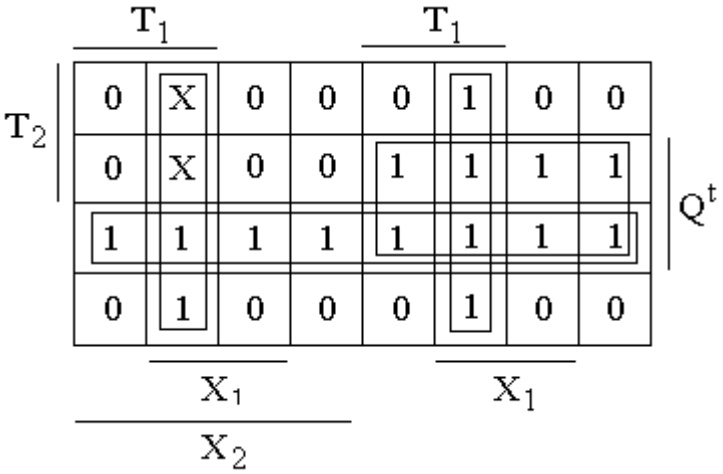



Рисунок 5.29 – Карти мінтермів для характеристичного рівняння квантрона спрощеної субсистеми модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації

З карти мінтермів характеристичне рівняння квантрона модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації записується у вигляді

$$Q^{t+1} = Q^t(\overline{X}_2 + \overline{T}_2) + T_1 X_1.$$

Синтезуємо спрощену модифікацію субсистеми модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису. Граф переходів і опис даної субсистеми наведені на рисунку 5.30 та у таблиці 5.7, відповідно.

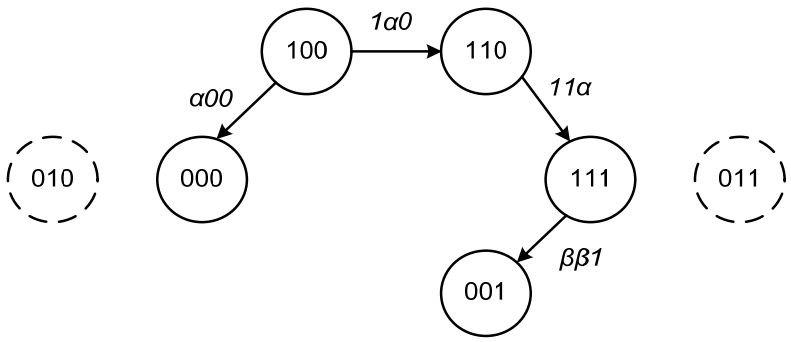



Рисунок 5.30 – Граф переходів спрощеної субсистеми модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації

Таблиця 5.7 – Опис спрощеної субсистеми модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації

| Номер стану | t | | | t + 1 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | A | B | C |
| 1 | 0 | 0 | 0 | $\alpha$ | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | $\alpha$ | 0 |
| 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | $\alpha$ |
| 4 | 1 | 1 | 1 | β | β | 1 |
| 5 | | | 1 | X | X | X |

Перетворення скороченої таблиці переходів (табл. 5.8) у словники показане на рис. 5.31, а карти мінтермів станів і функцій входів квантрона - на рис. 5.32.

Таблиця 5.8 – Скорочена таблиця переходів

| T | $Q^t$ | $X_1$ | $X_2$ | $Q^{t+1}$ | $f_q$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | α |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | α |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | α |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | X | X |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | β |
| 1 | 1 | 1 | 1 | X | X |

Переходи аргументу функції

$T_1=0$ →

| $f_q$ | $X_1$ | $X_2$ |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,1 |
| 1 | 0,1 | 0,1 |
| α | 1 | 0,1 |
| β | - | - |

Словник 1

$T_2=0$ →

| $f_q$ | $X_1$ | $X_2$ |
|---|---|---|
| 0 | 0 | X |
| 1 | X | X |
| α | 1 | X |
| β | - | - |

Переходи аргументу функції

$T_1=0$ →

| $f_q$ | $X_1$ | $X_2$ |
|---|---|---|
| 0 | 0,1 | 0,1 |
| 1 | 0,1 | 0 |
| α | 1 | 0 |
| β | 0,1 | 1 |

Словник 2

$T_2=0$ →

| $f_q$ | $X_1$ | $X_2$ |
|---|---|---|
| 0 | X | X |
| 1 | X | 0 |
| α | 1 | 0 |
| β | X | 1 |

Рисунок 5.31 – Перетворення таблиці переходів спрощеної субсистеми квантрона модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації

$A^{t+1}$

| B \ A | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | β | X | X |
| 1 | X | X | X |

C

$B^{t+1}$

| B \ A | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | β | X | X |
| α | X | X | 0 |

C

$C^{t+1}$

| B \ A | | | |
|---|---|---|---|
| α | 1 | X | X |
| 0 | X | X | 0 |

C

Рисунок 5.32 – Карти мінтермів станів квантронів спрощеної субсистеми модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації

Трансполяція діаграм Вейча (рис. 5.33) у рівняння входів спрощеної субсистеми квантрона модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації приводить до таких виразів:

$$(X_I)_A=X;\ (X_I)_B=A;\ (X_I)_C=B; \qquad (5.22)$$

$$(X_2)_A=C;\ \ (X_2)_B=C;\ \ (X_2)_C=0. \qquad (5.23)$$

Із синтезованої структурної схеми модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації (рис. 5.34) видно, що поширення отриманих виразів на довільне число розрядів приводить до побудови модуля із заздалегідь заданим коефіцієнтом перетворення, рівним числу його розрядів.

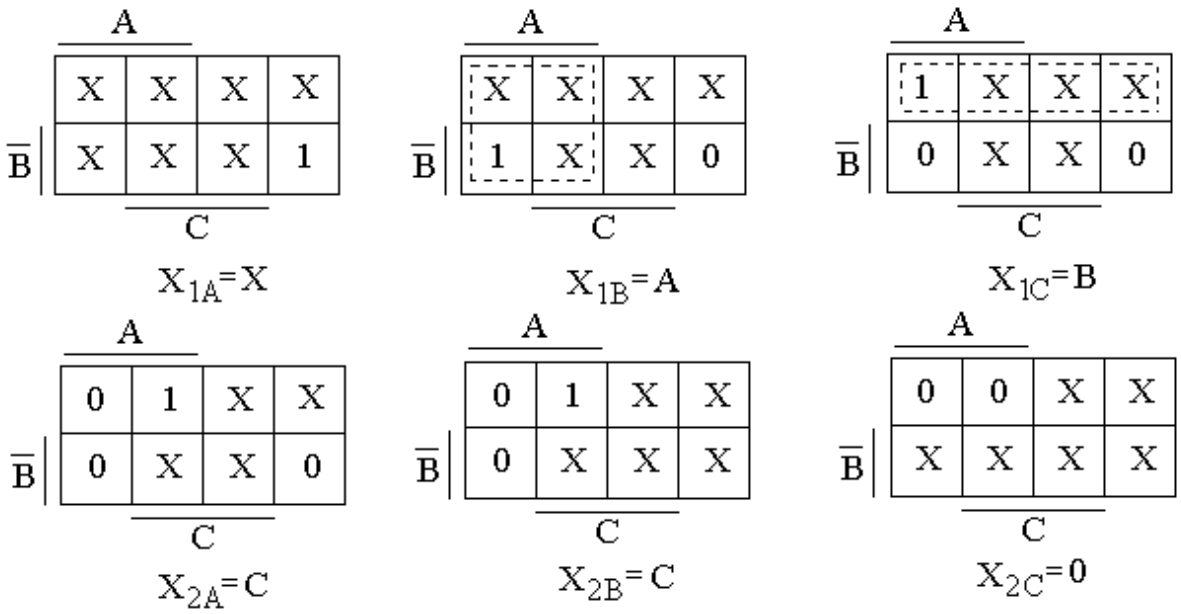



Рисунок 5.33 – Карти мінтермів функцій входів квантронів спрощеної субсистеми модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації

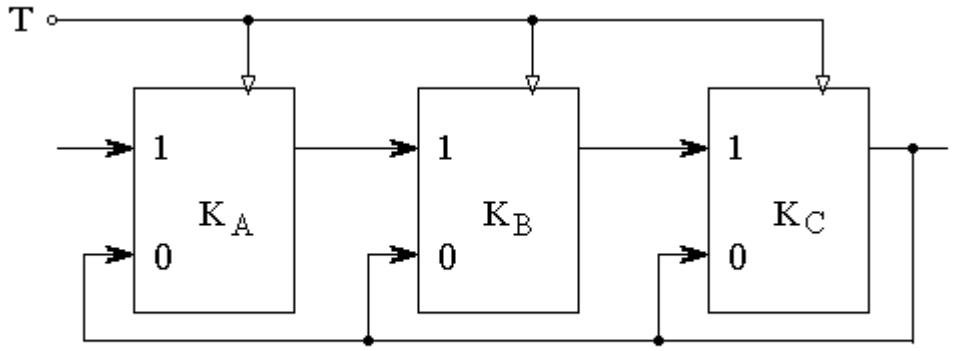



Рисунок 5.34 – Спрощена структурна схема оптоелектронного модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації

У ряді випадків таке перетворення виявляється неефективним, тому синтезуємо оптоелектронный модуль зі "шторково-маркерным" принципом запису інформації з довільним коефіцієнтом перетворення, значення якого може змінюватися в залежності від часових характеристик вхідного сигналу. Для цього наведемо таблицю перетворення переходів квантрона (табл. 5.9), повний граф переходів субсистеми модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації (рис. 5.35, 5.36). Опис субсистеми такого модуля даний у таблиці 5.10.

Таблиця 5.9 – Таблиця переходів

| $Q^t$ | $X_1$ | $X_2$ | $Q^{t+1}$ | $f_q$ |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | α |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | β |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Переходи аргументу функції

| $f_q$ | $X_1$ | $X_2$ |
|---|---|---|
| 0 | 0,1 | 0,1 |
| 1 | 0,1 | 0,1 |
| α | 1 | 0 |
| β | 0,1 | 1 |

Словник

| $f_q$ | $X_1$ | $X_2$ |
|---|---|---|
| 0 | X | X |
| 1 | X | X |
| α | 1 | 0 |
| β | X | 1 |

Рисунок 5.35 – Перетворення таблиці переходів квантронів зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації в словник

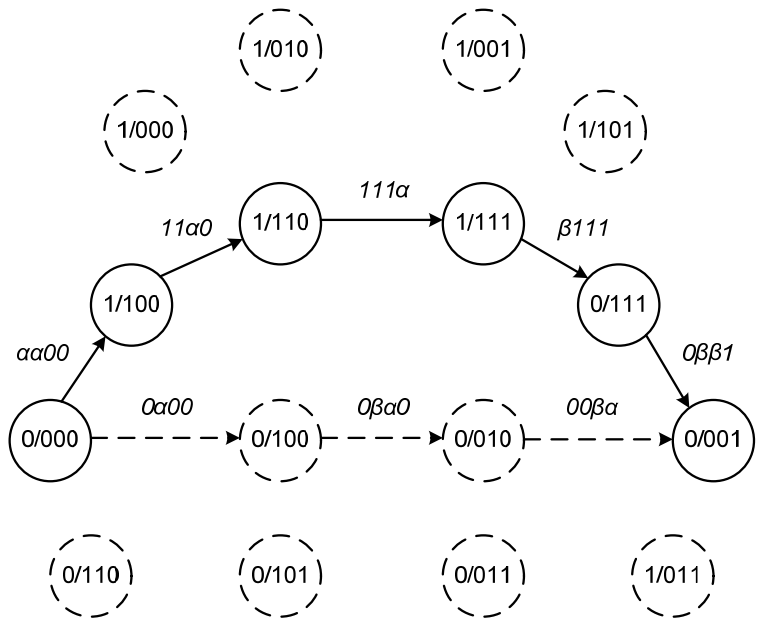



Рисунок 5.36 – Граф переходів модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації

Таблиця 5.10 – Опис субсистеми оптоелектронного модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації

| Номер стану | t | | | | t + 1 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | A | B | C | D |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | α | α | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | X | X | X | X |
| 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | X | X | X | X |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | α | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | X | X | X | X |
| 6 | 1 | 0 | 1 | 0 | X | X | X | X |
| 7 | 0 | 1 | 1 | 0 | X | X | X | X |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | α |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 1 | X | X | X | X |
| 10 | 1 | 0 | 0 | 1 | X | X | X | X |
| 11 | 0 | 1 | 0 | 1 | X | X | X | X |
| 12 | 1 | 1 | 0 | 1 | X | X | X | X |
| 13 | 0 | 0 | 1 | 1 | X | X | X | X |
| 14 | 1 | 0 | 1 | 1 | X | X | X | X |
| 15 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | β | β | 1 |
| 16 | 1 | 1 | 1 | 1 | β | 1 | 1 | 1 |

Складемо карту мінтермів станів квантронів модуля (рис. 5.37) і карту мінтермів функцій входів квантронів (рис. 5.38).

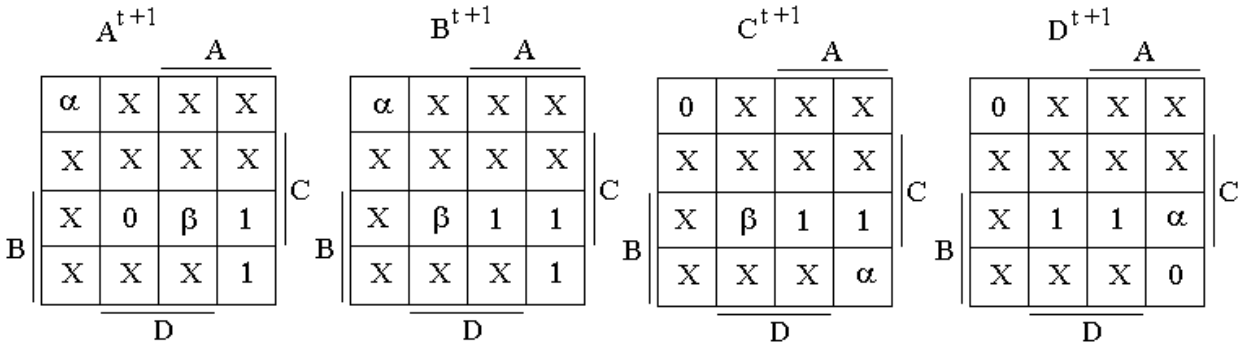



Рисунок 5.37 – Карти мінтермів станів квантронів модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису

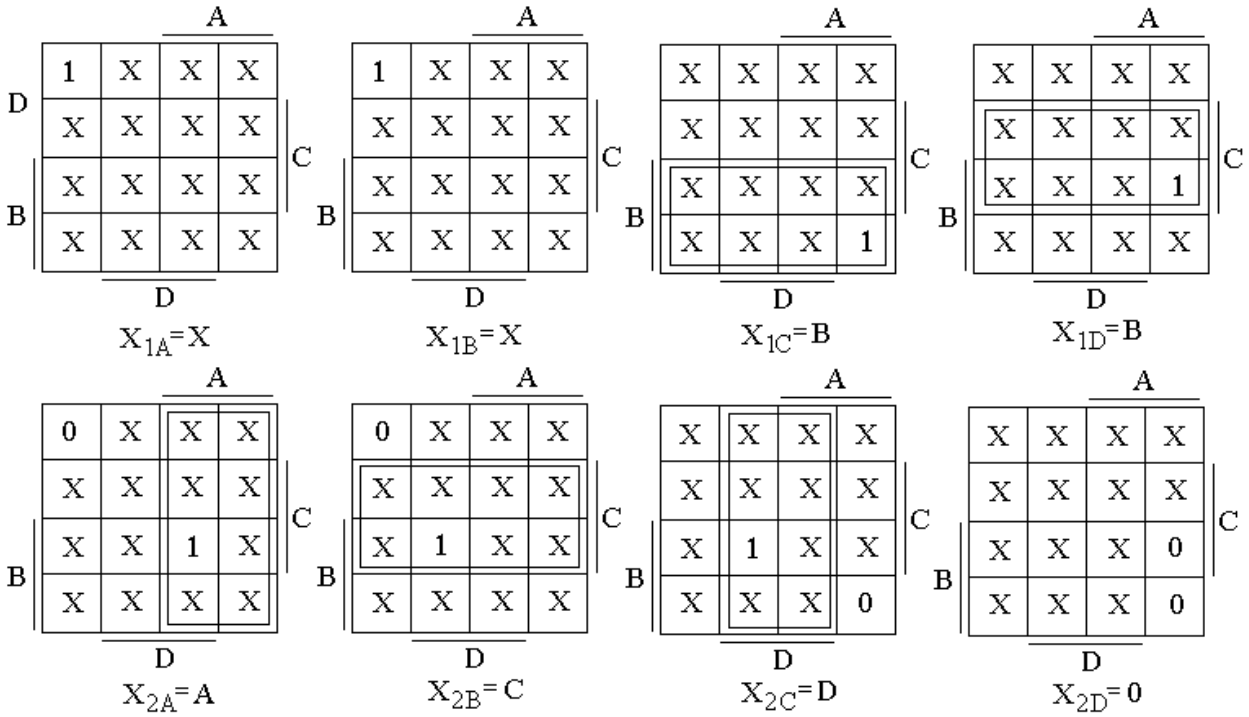



Рисунок 5.38 – Карти мінтермів функції входів модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації

У даній субсистемі один із квантронів (рис. 5.39), для визначеності - А, є допоміжним. Таблиця переходів і карта для складання характеристичного рівняння наведені в табл. 5.11 і на рис. 5.40, відповідно.

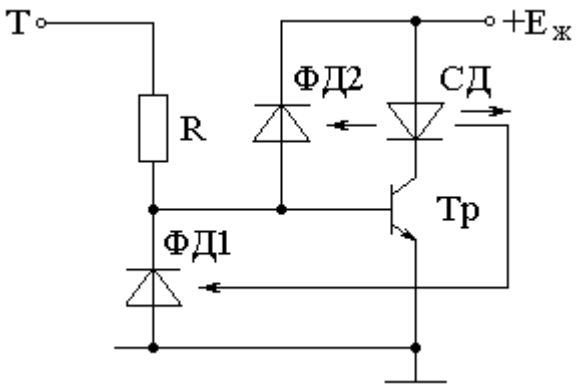



Рисунок 5.39 – Допоміжний квантрон модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації

Таблиця 5.11 – Таблиця переходів

| T | $Q^t$ | K | $Q^{t+1}$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 |

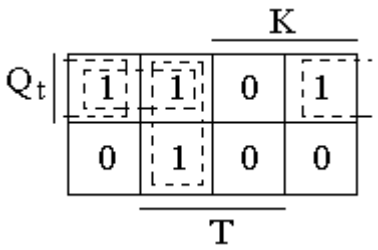



Рисунок 5.40 – Карта мінтермів для характеристичного рівняння допоміжного квантрона

Відзначимо, що закон функціонування допоміжного квантрона залежить від часової змінної K.

Характеристичне рівняння допоміжного квантрона можна записати так:

$$Q^{t+1} = \overline{K}(Q^t + T) + \overline{T}Q^t.$$

З діаграми Вейча (рис. 5.37) випливає, що рівняння входів квантронів модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації має вигляд

$$(X_1)_A = X;\ (X_1)_B = X;\ (X_1)_C = B;\ (X_1) = C; \qquad (5.24)$$

$$(X_2)_A = A;\ (X_2)_B = C;\ (X_2)_C = D;\ (X_2) = 0. \qquad (5.25)$$

Користуючись виразами (5.24) та (5.25), неважко побудувати структурну схему оптоелектронного модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації (рис. 5.41).

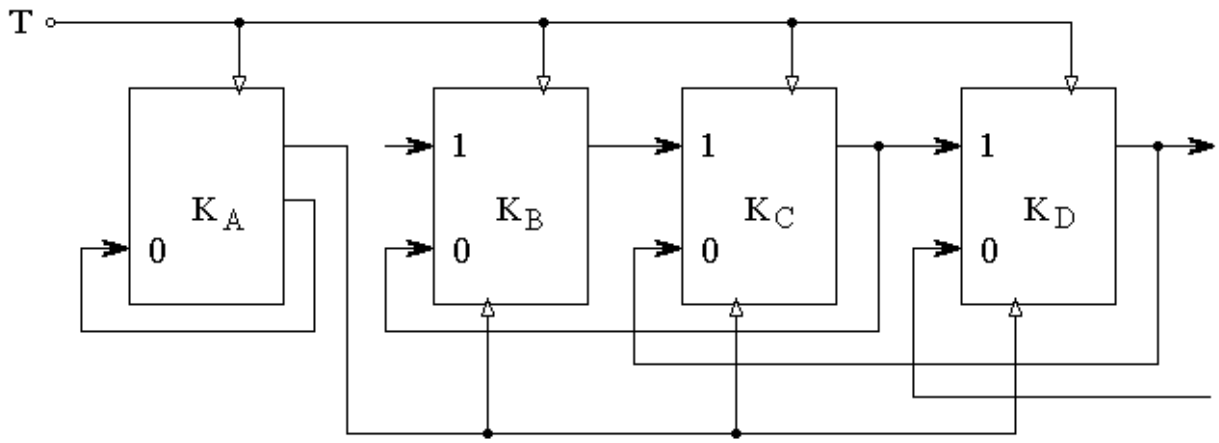



Рисунок 5.41 – Структурна схема оптоелектронного модуля зі "шторково-маркерним" принципом запису інформації

Таким чином, на основі апарату синтезу логічних схем нескладно побудувати структурні схеми оптоелектронних модулів зі "шторковим", "маркерним" і "шторково-маркерним" принципами запису інформації.

### 5.3.3 Динамічні оптичні оперативні запам’ятовувальні пристрої на ВОЛЗ

Оптичну пам’ять, як і звичайну, можна розділити на короткочасну та довготривалу. Короткочасна пам’ять забезпечує збереження невеликого об’єму інформації, завантажується швидко, час збереження – до 30 секунд. Довготривала пам’ять являє собою постійну пам’ять з тривалим часом зберігання бази знань. У попередніх підрозділах був розглянутий один з варіантів реалізації статичної оперативної пам’яті з використанням квантронів. Одним з найпростіших способів побудови динамічної оперативної пам’яті є застосування часових затримок, які можна реалізувати на оптичній елементній базі – волоконно-оптичному світловоді.

Як динамічний оптичний оперативний запам’ятовувальний пристрій (ДООЗП) використовується кільце з волоконно-оптичного світловода, по якому циркулюють світлові імпульси (рисунок 5.42). Для введення та виведення оптичної інформації використовуються два відгалужувачі (В).

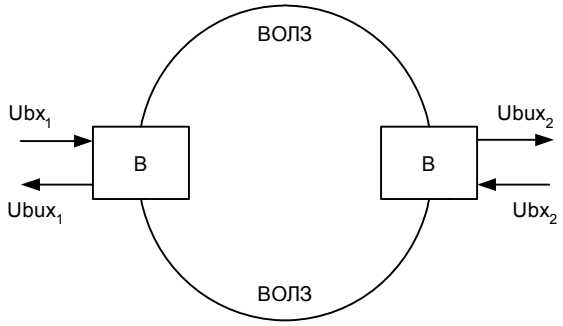



Рисунок 5.42 – Структурна схема базового елемента ДООЗП

Вихідний сигнал елемента дорівнює вхідному сигналу, який затриманий на одиницю часу. У випадку дискретного вхідного сигналу *f(k)* вихідний сигнал буде мати вигляд *f(k-1),* де *к* – часовий індекс. Блок–схема та імпульсна характеристика (реакція за інтенсивністю на вхідний імпульсний сигнал) показані на рисунку 5.43, а. Передбачається, що показник заломлення матеріалу волокна складає величину порядку 1,5. Для цієї умови затримка при розповсюдженні буде складати біля 5нс/м. Для відведення світових сигналів можна скористатись різними пристроями – направленими відгалужувачами, згинами світловодів. Математично

вихідний сигнал відрізняється від вхідного в К раз, де К – деяка постійна (рис. 5.43, б).

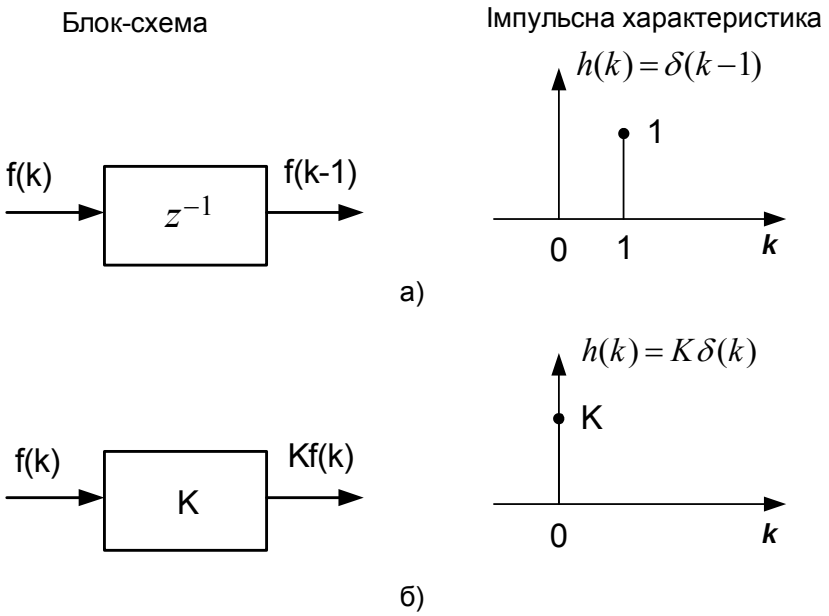



Рисунок 5.43 – Блок схема та імпульсна характеристика:
а) елемента затримки, б) елемента відгалуження

На основі одномодового світловоду та направлених відгалужувачів можна створити динамічний оптичний елемент пам’яті (ДОЕП) (рис. 5.44, а).

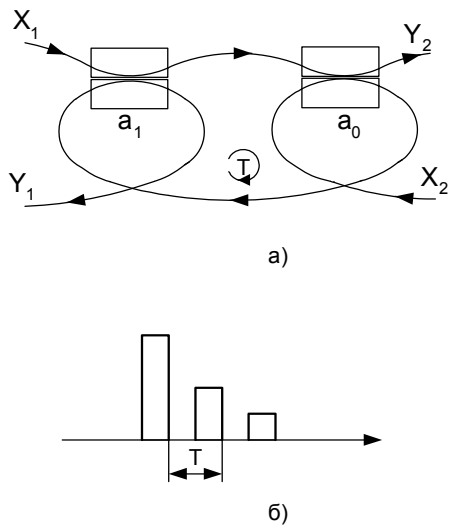



Рисунок 5.44 – Схема (а) та імпульсна характеристика (б) рециркуляційної лінії затримки з двома відгалужувачами

Елемент оптичної динамічної пам’яті складається з одномодового

волоконно-оптичного контуру із затримкою Т, який замкнутий сам на себе через два направлених відгалужувачі. При цьому частина світла з другого відгалужувача через волоконний контур поступає назад на перший відгалужувач. Внаслідок цього оптичні сигнали, що поступили на вхід $X_1$, почнуть багаторазово циркулювати в контурі й при цьому будуть частково потрапляти на виходи $Y_1$, $Y_2$. Імпульсна характеристика такої системи складається з ряду спадних максимумів, які знаходяться на однаковій відстані один від одного в часі на величину затримки в контурі $T$ (рис. 5.44, б).

Зв'язок між виходом та входом направленого відгалужувача (рис. 5.45) можна описати комплексною передавальною матрицею розміром 2х2

$$\begin{pmatrix} E_3 \\ E_4 \end{pmatrix} = (\gamma)^{1/2} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}, \tag{5.26}$$

де $(E_1, E_2)$ та $(E_3, E_4)$ комплексні амплітуди векторів напруженості $E_1$, $E_2$, $E_3$, $E_4$ відповідно на вході та виході відгалужувача.

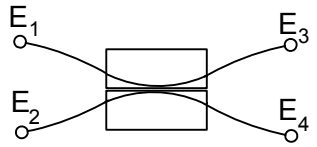



Рисунок 5.45 – Схема волоконно-оптичного направленого відгалужувача

Оскільки відгалуженням у зворотному напрямку можна знехтувати, то матрицю можна зобразити як добуток деякого загального амплітудного коефіцієнта пропускання $(\gamma)^{1/2}$ $(0{,}9 < \gamma < 1)$ та унітарної матриці. Для унітарної матриці справедливі співвідношення:

$$|A|^2 + |B|^2 = |C|^2 + |D|^2 = 1, \tag{5.27}$$

$$CA^* + DB^* = 0,$$

де зірочка означає комплексно спряжену величину.

У випадку симетричного відгалужувача A=D, B=C співвідношення

(5.26) може бути переписано у вигляді

$$\begin{pmatrix} E_3 \\ E_4 \end{pmatrix} = (\gamma)^{1/2} \begin{pmatrix} \sqrt{1-K} & j\sqrt{K} \\ j\sqrt{K} & \sqrt{1-K} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}, \qquad (5.28)$$

де $\sqrt{K}$ – коефіцієнт зв'язку за амплітудою;

$j = \sqrt{-1}$ означає зсув фази сигналу на $90^0$.

При використанні некогерентного джерела зв'язок між інтенсивністю сигналу на вході та виході можна зобразити таким виразом:

$$\begin{pmatrix} I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = (\gamma) \begin{pmatrix} 1-K & K \\ K & 1-K \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix}, \qquad (5.29)$$

де ($I_1$, $I_2$) та ($I_3$, $I_4$) – інтенсивність сигналу відповідно на вході та виході відгалужувача;

γ – загальний коефіцієнт пропускання за інтенсивністю;

*К* – коефіцієнт зв'язку за інтенсивністю.

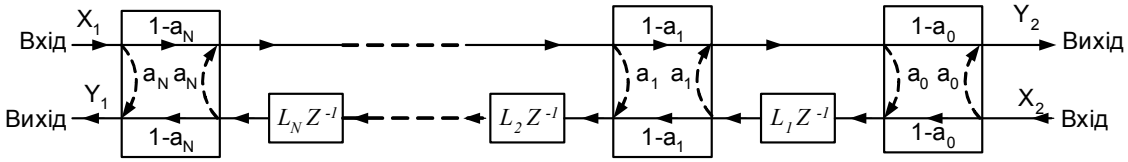



Рисунок 5.46 – Еквівалентна схема волоконно-оптичної структури N-го порядку з (N+1) відгалужувачем та N елементами затримки (L –коефіцієнт пропускання за інтенсивністю у відповідній ланці)

Для дослідження процесів в ДООЗП застосуємо метод Z-перетворень. Його застосування виправдовується тим, що система, яка розглядається, по-перше, лінійна й інваріантна в часі, по-друге, дискретна в часі. Останнє обумовило можливість введення деякої базової затримки на час *T*, відносно якої інші затримки будуть виражатись кратними числами. Іншими словами, імпульсна характеристика системи складається з ряду максимумів, що

знаходяться на однаковій відстані. Це дозволяє спростити математичний аналіз припустивши, що сигнали в системі існують лише в дискретні моменти часу. Оскільки в цьому випадку сигнали на вході та виході описуються дискретними миттєвими значеннями, то такі системи називаються дискретними або імпульсними.

Математичний аналіз імпульсних систем в основному аналогічний аналізу безперервних систем, але в той же час простіший та фізично більш наочний.

Z-образ F(z) сигналу f(k) визначається як результат Z-перетворення:

$$F(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k) z^{-k} , \qquad (5.30)$$

де $k$ – часовий індекс, який дорівнює деякому кратному числу від базового часу затримки $T$ $(k = nT)$;

$z$ – змінна перетворення, яка являє собою одиницю часового випередження ($z^{-1}$ відповідає одиниці запізнення).

Зв'язок між вхідними та вихідними сигналами описується передавальною функцією системи, яка дорівнює відношенню $Z$-образу вихідного сигналу до $Z$-образу сигналу на вході. Частотну характеристику системи можна обчислити, якщо підставити в передавальну функцію значення $z = e^{j\omega T}$ , що визначає коло одиничного радіусу з центром на початку координат на $Z$-площині. Для стійкості системи всі полюса її передавальної функції повинні знаходитись в середині кола одиничного радіуса. Пам'ять на волоконних світловодах буде стійкою, якщо вона не містить елементів, що дають підсилення.

Застосовуючи означення Z-перетворення (5.30), знайдемо вираз для передавальної функції H(z) рециркуляційної лінії затримки з двома відгалужувачами (рис. 5.44).

а) для системи, у якої входом є $X_1$, а виходом $-Y_1$

$$H_{11}(z) = \frac{a_1 + (1 - 2a_1)\, a_0\, l_1\, z^{-1}}{1 - a_1\, a_0\, l_1\, z^{-1}} , \qquad (5.31)$$

де $a_1$ та $a_0$ –коефіцієнти зв'язку відгалужувача за інтенсивністю;
$l_1$ – коефіцієнт пропускання контуру системи за інтенсивністю.

Як видно з (5.31) система має єдиний нуль, що розташований в

$$z = \frac{(2a_1 - 1)}{a_1} a_0 l_1 ,$$

а також єдиний полюс в точці $z = a_1 a_0 l_1$.

б) для системи, у якої входом є $X_1$, а виходом –$Y_2$

$$H_{21}(z) = \frac{(1-a_1)(1-a_0) l_{11}}{1 - a_1 a_0 l_1 z^{-1}} , \qquad (5.32)$$

де $l_{11}$ – коефіцієнт пропускання світловоду за інтенсивністю в каналі прямого зв'язку.

Система містить один нуль на початку координат, а також один полюс в точці $z = a_1 a_0 l_1$.

Розглянемо лінійну інваріантну у часі систему з двома портами, кожний з яких містить два входи. На першому та другому портах присутні сигнали $(X_1, Y_1)$ та $(X_2, Y_2)$ відповідно до рис.5.47.

а) б)

Рисунок 5.47 – Двопарна система: а) схема зі зворотним зв'язком та б) схема з прямим зв'язком

Таку структуру назвемо двопарною системою зі зворотним зв'язком. Якщо на першому та другому портах присутні сигнали $(X_1, X_2)$ та $(Y_1, Y_2)$, то таку систему назвемо двопарною системою з прямим зв'язком. Вхідні (X) та вихідні (Y) змінні пов'язані одна з одною за допомогою передавальної

матриці:

$$\begin{pmatrix} Y_1(z) \\ Y_2(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11}(z) & H_{12}(z) \\ H_{21}(z) & H_{22}(z) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1(z) \\ X_2(z) \end{pmatrix}, \tag{5.33}$$

де $z$ – змінна $Z$-перетворення.

Функція $H_{mn}(z)$ в (5.33) є передавальною функцією, що пов'язує вхідну змінну $X_n$ з вихідною змінною $Y_m$.

Для аналізу двопарних систем зі зворотним зв'язком можна використати ланцюгову матрицю, яка пов'язує між собою пари змінних $(X_1, Y_1)$ та $(X_2, Y_2)$:

$$\begin{pmatrix} X_1(z) \\ Y_1(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11}(z) & G_{12}(z) \\ G_{21}(z) & G_{22}(z) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_2(z) \\ X_2(z) \end{pmatrix}. \tag{5.34}$$

Як передавальна, так і ланцюгова матриця мають розміри 2 x 2 й однозначно визначені для задання вхідних та вихідних змінних. Елементи передавальної матриці для двопарної системи зі зворотним зв'язком пов'язані з елементами ланцюгової матриці для тієї ж системи такими співвідношеннями:

$$H_{11} = \frac{G_{21}}{G_{11}},\ H_{12} = \frac{G_{11}G_{12} - G_{12}G_{21}}{G_{11}},\ H_{21} = \frac{1}{G_{11}},\ H_{22} = \frac{G_{12}}{G_{11}}. \tag{5.35}$$

Якщо виконується умова $G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21} = 1$, то система називається взаємно зворотною. У випадку каскадно з'єднаних двопарних систем зі зворотним зв'язком ланцюгова матриця складової системи дорівнює добутку окремих ланцюгових матриць:

$$G_{total} = G_1 G_2 G_3 \ldots G_N\ . \tag{5.36}$$

Аналогічне правило добутку матриць, але взятих зі зворотним порядком, справедливе й для передавальної матриці двопарної системи з прямим зв'язком:

$$H_{total} = H_N \ldots H_3 H_2 H_1\,. \tag{5.37}$$

Для направленого відгалужувача з коефіцієнтом зв'язку $a$ передавальна матриця $Hc$ та ланцюгова матриця $Gc$ задаються такими виразами:

$$Hc = \begin{pmatrix} 1-a & a \\ a & 1-a \end{pmatrix}, \qquad 5.38)$$

$$Gc = \frac{1}{1-a}\begin{pmatrix} 1 & -a \\ a & 1-2a \end{pmatrix}, \qquad (5.39)$$

Аналогічно для матриць найпростішої системи з двох ліній затримки з одиничним часом затримки $z^{-1}$ та коефіцієнтом пропускання за інтенсивністю $l_{11}$, $l_{12}$ (рис. 5.48):

$$Hd = \begin{pmatrix} l_{11} & 0 \\ 0 & l_{12}z^{-1} \end{pmatrix}, \qquad (5.40)$$

$$Gd = \frac{1}{l_{11}}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & l_{11}l_{12}z^{-1} \end{pmatrix}. \qquad (5.41)$$

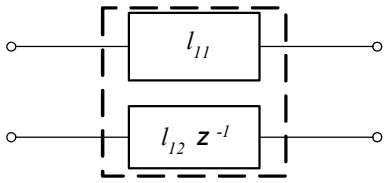



Рисунок 5.48 – Спрощена система затримки з двома лініями, $l_{11}$ та $l_{12}$ – коефіцієнт пропускання за інтенсивністю першої та другої волоконної лінії; $z^{-1}$– одиничний час затримки

Елемент оптичної динамічної пам'яті являє собою одночасно два каскадно з'єднаних відгалужувачі та лінію з двома елементами затримки. Тому на основі виразів (5.36)–(5.41) можна обчислити ланцюгову матрицю рециркуляційної лінії затримки та передавальну матрицю лінії затримки з двома відгалужувачами:

$$Gb = Gc_1 \cdot Gd \cdot Gc_0 = \frac{1}{l_{11}(1-a_1)\cdot(1-a_0)} \cdot \begin{pmatrix} G'_{11} & G'_{21} \\ G'_{12} & G'_{22} \end{pmatrix} \qquad (5.42)$$

де

$$\begin{cases} G'_{11} = 1 - a_1 a_0 l_1 z^{-1} \\ G'_{12} = -a_0 - a_1(1-2a_0) l_1 z^{-1} \\ G'_{21} = a_1 + (1-2a_1) a_0 l_1 z^{-1} \\ G'_{22} = -a_1 a_0 + (1-2a_1)(1-2a_0) l_1 z^{-1} \end{cases}, \qquad (5.43)$$

а $l_1 = l_{11}\, l_{12}$ є коефіцієнт пропускання контуру за інтенсивністю;

$Gc_1$ та $Gc_0$ – ланцюгові матриці відгалужувача (вираз (5.39)) з коефіцієнтом зв'язку $a_1$ та $a_0$;

$Gc_1 \quad Gd$ – ланцюгова матриця двоелементної лінії затримки, яка задана виразом (5.41).

Крім того елементи, що відповідають передавальній матриці можуть бути знайдені з виразу (5.35):

$$Hb = Hc_1 \cdot Hd \cdot Hc_0 = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix}, \qquad (5.44)$$

$$\begin{aligned} H_{11} &= (1-b_1)(1-b_0) l_{11} + b_1 b_0 l_{12} z^{-1}; \\ H_{12} &= b_1(1-b_0) l_{11} + (1-b_1) b_0 l_{12} z^{-1}; \\ H_{21} &= (1-b_1) b_0 l_{11} + b_1(1-b_0) l_{12} z^{-1}; \\ H_{22} &= b_1 b_0 l_{11} + (1-b_1)(1-b_0) l_{12} z^{-1}; \end{aligned}. \qquad (5.45)$$

Скористуємось наведеним підходом в поєднанні з методом Z-перетворень з метою отримання виразів загального вигляду для передавальних функцій структур, що досліджуються.

Узагальнена лінійна система *n*-го порядку з дискретним часом в сучасній теорії керування описується в просторі станів рівнянням переходів станів й вихідним вигляду

$$\begin{cases} x(k+1) = A(k)\, x(k) + B(k)\, u(k); \\ \quad y(k) = C(k)\, x(k) + D(k)\, u(k). \end{cases} \qquad (5.46)$$

Великими буквами позначені матриці, малими буквами – вектори. У виразі (5.46) вектор *x(k)* є *n* - вимірний вектор стану, *u(k)*– *m*-вимірний вектор на вході, *y(k)* *p*-вимірний вектор на виході, а *A, B, C, D* – матриці відповідного розміру *(n* x *n)*, *(n* x *m)*, *(p* x *n)*, *(p* x *m)*. Для інваріантних до зсуву (в часі) систем вказані матриці не залежать від часу, а залежать від

параметрів системи, таких як коефіцієнт зв'язку або коефіцієнт втрат.

В математичній моделі, що описується виразом (5.46), в загальному випадку передбачається наявність у системі $m$ входів та $p$ виходів. Якщо система має єдиний вхід та єдиний вихід, то вираз (5.46) прийме вигляд

$$\begin{cases} x(k+1) = A(k)\,x(k) + b(k)\,u(k); \\ y(k) = c^T(k)\,x(k) + d(k)\,u(k), \end{cases}, \tag{5.47}$$

де $b$ та $c$ є вектори, а $d$ – скалярна величина.

Взявши як параметри стану вихідні величини елементів затримки, отримаємо такі вирази для матриць *A, B, C, D,* що описують структури N-го порядку з зворотним зв'язком

$$A = \begin{pmatrix} a_1 a_0 l_1 & a_2(1-a_1)a_0 l_1 & \cdots & a_N \prod_{k=1}^{N-1}(1-a_k)a_0 l_1 \\ (1-a_1)l_2 & a_2 a_1 l_2 & \cdots & a_N \prod_{k=2}^{N-1}(1-a_k)a_0 l_1 \\ 0 & & \ddots & a_N(1-a_{N-1})l_{N-1} \\ & & & (1-a_{N-1})\ln a_N a_{N-1} l_N \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} \prod_{k=1}^{N-1}(1-a_k)a_0 l_1 & (1-a_0)l_1 \\ \prod_{k=2}^{N-1}(1-a_k)a_0 l_1 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ (1-a_N)a_{N-1} l_N & 0 \end{pmatrix},$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 1-a_N \\ a_1(1-a_0) & a_2(1-a_1)(1-a_0) & \cdots & a_N \prod_{k=0}^{N-1}(1-a_k) \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} a_N & 0 \\ \prod_{k=0}^{N}(1-aK) & a_0 \end{pmatrix} \tag{5.48}$$

Вектори на вході та виході, а також вектор стану відповідають

$$u = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \qquad Y = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{pmatrix} \qquad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix}. \tag{5.49}$$

Зростання індексів відбувається із переміщенням зліва на право по схемі. Нескладно помітити, що всі елементи матриць та компоненти векторів є позитивними величинами, це означає що система відноситься до позитивної оптичної системи. Теорія позитивних систем тісно пов'язана з теорією позитивних матриць, яка розвинута досить вичерпно, що дозволяє

використовувати її результати для вивчення властивостей позитивних систем. Виходячи з моделі простору станів для лінійних систем, лінійна позитивна система визначається як лінійна система, параметри стану (а також вихідні сигнали) якої позитивні.

Втрати енергії в направлених відгалужувачах й оптичних волокнах, а також втрати через велику кількість виходів, призводять до появи внесених втрат, які не дорівнюють нулю. Виникає практичний інтерес, яка кількість світлової енергії буде досягати виходу.

Для розрахунку світлового потоку на виході при заданому потоці на вході застосуємо передавальну функцію системи *H(z),* яка обчислюється за виразами (5.31, 5.32). Для цього достатньо врахувати, що світловий потік пропорційний нульовій складовій спектра (*f=0*) в смузі частот модуляції. В передавальній функції цій складовій відповідає *z = 1* ($z = e^{j2\pi fT}$), отримаємо таке співвідношення між значеннями світлового потоку на вході й виході системи:

$$Po = \left[H(1)\right] Pi\,, \tag{5.50}$$

де $Po$, $Pi$ – світловий потік відповідно на виході та вході системи.

Таким чином, відношення вихідного світлового потоку до вхідного дорівнює значенню передавальної функції при *z = 1:*

$$\eta \cdot \frac{Po}{Pi} = H(1)\,. \tag{5.51}$$

Для елемента пам’яті, який побудований на рециркуляційній лінії затримки з двома відгалужувачами

$$\eta_1 = \frac{a_1 + (1-2a_1)a_0 l_1}{1 - a_1 a_0 l_1}\,, \tag{5.52}$$

$$\eta_2 = \frac{(1-a_1)(1-a_0)l_{11}}{1 - a_1 a_0 l_1}\,, \tag{5.53}$$

де $\eta_1$–ефективність у випадку, коли $X_1$ є входом , а $Y_1$ виходом;

$\eta_2$–ефективність у випадку, коли $X_1$ є входом , а $Y_2$ виходом;

$a_1$, $a_0$ – коефіцієнти зв'язку відгалужувачів за інтенсивністю;

$l_1$ – коефіцієнт пропускання кільця світловоду за інтенсивністю;

$l_{11}$ – коефіцієнт пропускання світловоду за інтенсивністю в каналі прямого зв'язку.

Графічні залежності $\eta_1 = F(a_1)$ та $\eta_2 = F(a_2)$ при різних значеннях $a_0$ наведені на рис.5.49 та рис. 5.50.

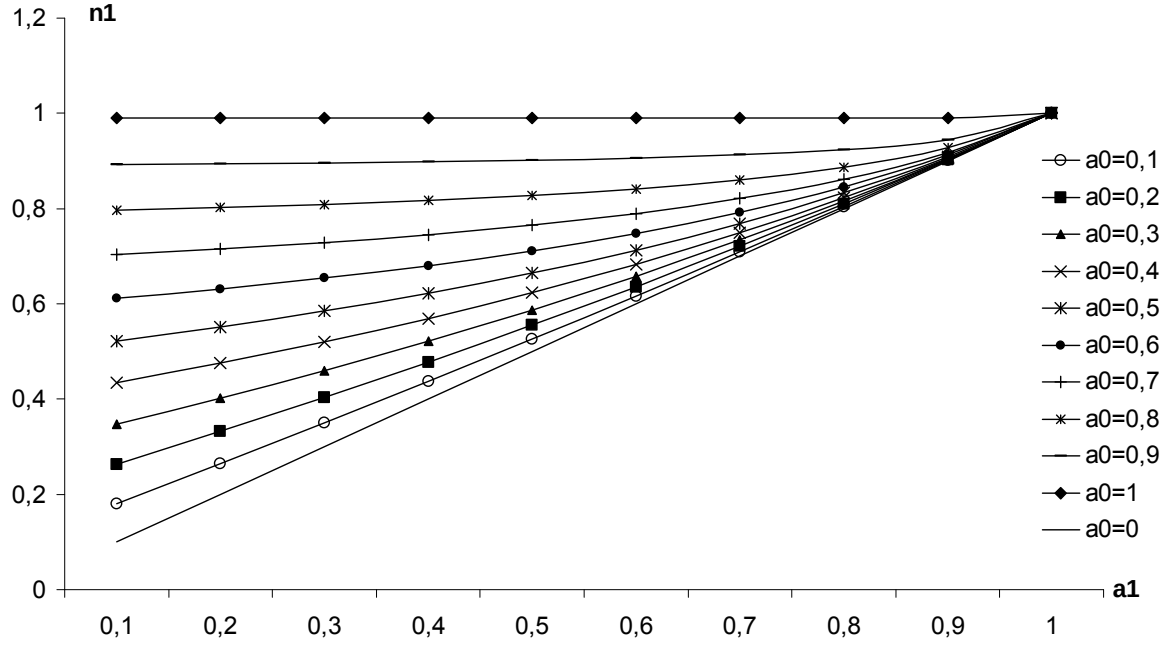



Рисунок 5.49 – Графік ефективності $\eta_1$ від коефіцієнта зв'язку $a_1$ при різних значеннях коефіцієнта зв'язку $a_0$ ($l_1$= 0.99)

Як видно з графіків зі збільшенням $a_0$ та $a_1$ світловий потік на виході $Y_2$ зменшується, а на виході $Y_1$ зростає. Якщо використовувати перший направлений відгалужувач для введення інформаційної послідовності (вхід *X1*), а другий для виведення збереженої оптичної інформаційної послідовності (вивід *Y2*) згідно з рис. 5.50, то коефіцієнти зв'язку відгалужувачів за інтенсивністю $a_0$ та $a_1$ повинні бути якомога меншими. Якщо використовувати перший направлений відгалужувач для введення інформаційної послідовності (вхід *X1*) та для виведення збереженої оптичної інформаційної послідовності (вивід *Y1*) згідно з рис. 5.50, то коефіцієнт зв'язку за інтенсивністю першого відгалужувача $a_1$ повинний бути якомога більшим, а другого відгалужувача $a_0$ – якомога меншими.

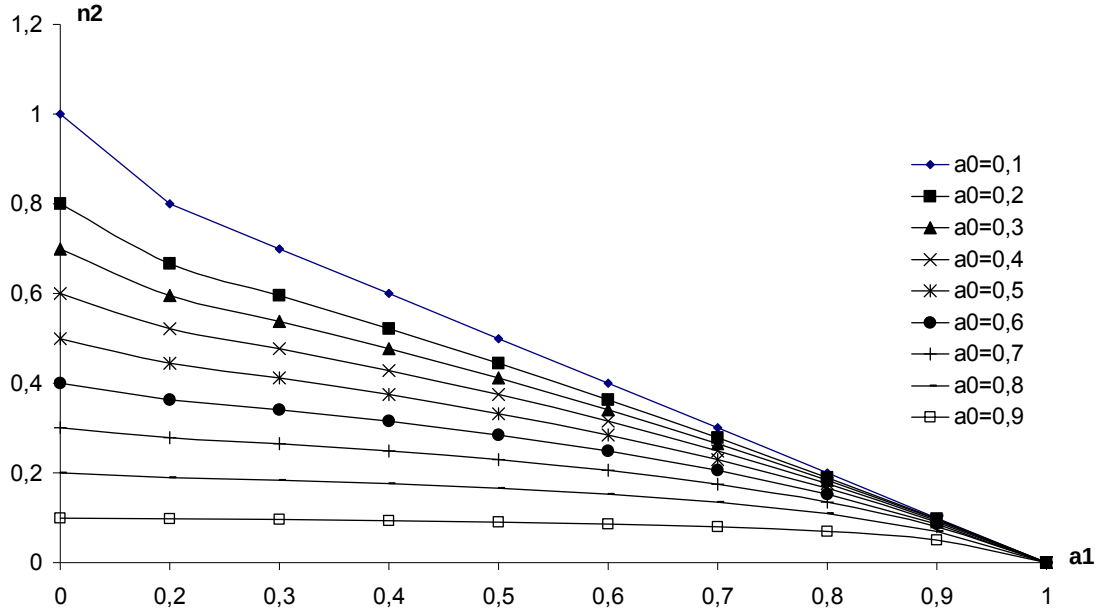



Рисунок 5.50 - Графік ефективності $\eta_2$ від коефіцієнта зв'язку $a_1$ при різних значеннях коефіцієнта зв'язку $a_0$ ($l_1$=0.99)

**Контрольні питання**

1. Наведіть можливу схему оптоелектронного елемента "І". Поясніть як вона працює.

2. Наведіть можливу схему оптоелектронного елемента "АБО". Поясніть як вона працює.

3. Наведіть можливі схеми оптоелектронного елемента "НІ". Поясніть як вони працюють.

4. Наведіть структурну схему оптоквантрона та поясніть її роботу.

5. До якого елемента цифрової схемотехніки є подібним оптоквантрон? Чим вони відрізняються?

6. Наведіть електричну схему оптоквантрона та поясніть її роботу. Яка умова повинна виконуватися для лавиноподібного перемикання оптоквантрона з одного стану в інший?

7. Наведіть електричну схему оптоелектронного генератора на основі оптоквантрона. Поясніть її роботу. За допомогою яких схемотехнічних рішень цю схему можна перетворити в схему очікувального генератора?

8. Наведіть схему елемента індикації з двокольоровими світлодіодами. Поясніть її роботу.

# 6 КВАНТОВА ОПТОЕЛЕКТРОНІКА

## 6.1 Техніко-економічні основи наноелектроніки

Розвиток мікроелектроніки характеризується законом Мура, за яким кожні півтора роки відбувається подвоєння кількості елементів на кристалі. Це досягається за рахунок удосконалення існуючих базових технологій, головним чином за рахунок зменшення розмірів активних компонентів інтегральних схем. Проте традиційна транзисторна мікроелектроніка підійшла до фізичних та технологічних меж, обумовлених тим, що вона основана на теорії кіл, яка за своєю природою є послідовною. Фізико-технологічні проблеми розвитку мікроелектроніки призводять до фундаментальних економічних меж, пов'язаних з капітальними вкладами, що постійно зростають і потрібні для подолання обмежень традиційної мікроелектроніки. Фізичними обмеженнями перш за все є квантові ефекти і невизначеності в області надмалих струмів. Технологічні обмеження пов'язані з розсіюванням потужності, складністю проектування і тунельними струмами.

Для досягнення вимог, які висуваються сьогоднішнім часом, повинні бути задіяні нові фізичні принципи та технології, такі як використання матеріалів $A_3B_5$, аналогових, оптоелектронних, комутаційних та інших підходів. У цих областях досягнуті значні результати, проте базовими напрямками розвитку є інтеграція нових елементів з традиційними МОН та біполярними транзисторними інтегральними схемами. У наш час відомі дві концепції розвитку: система на одному кристалі та система на кількох кристалах з оптичним зв'язком між ними. Економічна доцільність визначає остаточний вибір того чи іншого рішення. Фірма Intel, наприклад, виготовила Pentium-процесор, в якому логіка та пам'ять розташовані на одному кристалі.

Великою проблемою є перехресні завади при розташуванні на одному кристалі аналогових та цифрових пристроїв. Для технології „терабіт на одному чипі" потрібні альтернативні рішення вже у найближче десятиріччя. Такими рішеннями можуть бути одноелектронні прилади з квантоворозмірним тунелюванням, тунельно-резонансні діоди тощо.

Принципово новим рішенням є створення квантових процесорів, які

основуються на нових обчислювальних технологіях. З багатьох пропозицій щодо квантових комп'ютерів найбільш життєвими є оптоелектронні квантово-розмірні структури на багатокомпонентних напівпровідниках, які можуть працювати при кімнатних температурах і досягати швидкостей у діапазоні 10-100 ГГц.

Розв'язування проблем функціонального ускладнення пристроїв введенням до них елементів на квантово-розмірних гетероструктурах напівпровідникових з'єднань, таких як гетеролазери і світлодіоди, а також ступінь інтеграції кремнієвих ІС з мікронними та нанометровими розмірами елементів, яка постійно зростає, призвели до збільшення кількості входів і виходів та внутрішніх міжз'єднань. Це при збільшенні тактової частоти стає суттєвою перешкодою для монолітної інтеграції. Тому гібридні інтегральні схеми та багатокристальні складення у цих випадках стають більш економічно вигідними. Компонування одиничних кристалів здійснюється на горизонтальних платах, які можуть монтуватися у тривимірні мікроскладення. Горизонтальні багатокристальні модулі (ГБКМ) можуть виготовлятися на кремнієвих пластинах з вбудованими в них лазерними або світлодіодними випромінювачами і фотоприймачами, за допомогою яких здійснюються оптичні міжз'єднання окремих кристалів, ГБКМ або лінії виведення тривимірних модульних комплектів. При цьому застосовуються різні типи оптичних міжз'єднань: оптичний сигнал у вільному просторі; спрямовані (хвильоводні, світловодні) оптичні з'єднання; оптичні з'єднання між ГБКМ і ГБКМ; топографічні оптичні з'єднання; відбивні оптичні з'єднання, з'єднання зі змінною архітектурою; з'єднання, керовані оптичним транспарантом; акустооптична або електрооптична адресація з'єднань. Оптичні з'єднання без твердих механічних контактів спрощують складання і ремонт комплектів, створюють нові можливості конструювання апаратури, особливо швидкісної і надшвидкісної.

Особливий інтерес викликає інтеграція квантово-розмірних гетероструктур з кремнієвими ІС. При вирощуванні квантових точок на кремнії відпадає необхідність виконувати умову ізорешітності, оскільки вона у цьому випадку не є настільки суттєвою. Розходження в параметрах решітки може навіть використовуватися для самоорганізації структур

квантових точок, що відбувається при переході двовимірної (2D) у тривимірну (3D) моду росту, при якій утворюється суцільна плівка з'єднання $A_3B_5$ на Si. Незважаючи на тунельний надлишковий струм у таких структурах, вони цілком придатні для створення в них приладів, наприклад, фотоприймачів на InGaAs, що робить реальною повну монолітну інтеграцію приймальних модулів ВОЛЗ на основі кремнієвих інтегральних схем і фотоприймальних і надшвидкісних елементів на з'єднаннях $A_3B_5$. Це істотно підвищує надійність і знижує вартість, роблячи волоконно-оптичну техніку придатною для масових застосувань у радіооптичних системах і комп'ютерних мережах.

Досягнуті успіхи в створенні наноструктур $A_3B_5$ на Si показують перспективність використання кремнію як матеріалу підкладки для структур різного функціонального призначення. Це обумовлено не тільки можливістю полегшення інтеграції гетероструктур із кремнієвими ІС, але й перспективами широкого впровадження приладів наноелектроніки.

### 6.2 Квантові комп'ютери

Іонні нанотехнології дозволяють формувати напівпровідникові наноструктури з обчислювальною здатністю, яка на кілька порядків перевищує традиційні транзисторні елементи. Стає реальною задача побудови квантового комп'ютера.

Можливі два підходи для створення квантового комп'ютера: використання квантових елементів у традиційних комп'ютерах і застосування принципів квантової механіки для обчислень.

Для реалізації квантового комп'ютера в обох випадках звичайно використовують оптику, яка є зручною для створення в просторі паралельних структур. Класичним прикладом першого підходу при створенні квантового комп'ютера є перетворення картин у когерентних оптичних обчислювачах. В другому варіанті використовуються генетичні алгоритми, за допомогою яких генерується картинно-відновлювальна маска. Корпускулярно-хвильовий дуалізм квантової механіки полягає в неможливості однозначно передбачити результати в числовому або імовірнісному сенсі.

Класичні досліди з проходженням фотонів через дві щілини показують можливість отримання відповіді без проведення численних проміжних операцій. Відомо, що ефективність звичайних комп'ютерів (суперкомп'ютерів) обмежується проблемами дисипації тепла. Теоретично кожна операція бінарного вентиля вимагає витрат енергії принаймні до $T \cdot ln2$. Використовуючи математичні методи, які називаються генетичними алгоритмами, можливо визначати нові рецептори (геноми) і шляхом порівняння вимірювати кінцевий результат без участі фізичних логічних вентилів. Просто детектуються відповіді від „обраних батьків". У цьому випадку енергія на вентиль істотно нижча теоретичної межі $T \cdot ln2$. У квантових оптичних комп'ютерах усі піксели працюють паралельно, що суттєво підвищує швидкодію системи, зменшує споживану енергію, підвищує точність і надійність.

Оптичні когерентні комп'ютери застосовуються в тих областях, де необхідно виконувати великі обсяги обчислень, які не вимагають високої точності. У них досягається швидкість $10^{12}$ - $10^{14}$ біт/с, яка недосяжна звичайними мікроелектронними методами при економічно виправданих витратах. У класичних обчислювачах застосовуються газові лазери, що мають високу часову і просторову когерентність. Діаметр світлового пучка джерела задовольняє співвідношення

$$d=1{,}22 \cdot \lambda \cdot f,$$

де $\lambda$ - довжина хвилі світла;

$f$ - фокусне число, яке дорівнює відношенню фокусної відстані до апертури.

На вході оптичного комп'ютера (ОК) розташовується просторово-часовий модулятор, на виході – матриця фотоприймачів, яка перетворює світло в електричні сигнали. Основними елементами ОК є оптичні лінзи, які виконують такі математичні процедури:

- одно- або багатоканальний аналіз спектра в одному або двох вимірах;
- одно- або багатоканальна просторово-частотна погоджена фільтрація;

- кореляція.

В оптичній лінзі відбувається двовимірне Фур'є-перетворення розподілу амплітуди світла, яке описується рівнянням:

$$E_2(\omega_x, \omega_y) = C_0 \iint E_1(x_1, y_1) \exp\left[-j(w_x x_1 + w_y y_1)\right] dxdy,$$

де $E_1$ і $E_2$ - розподіли амплітуди електричного поля у вхідній і вихідній площинах, відповідно;

$\omega_x$ і $\omega_y$ - кутові просторові частоти, які зв'язані з координатами вихідної площини $\omega_x = 2\pi x_2/\lambda F$, $\omega_y = 2\pi y_2/\lambda F$;

$F$ - фокусна відстань.

У некогерентних оптичних комп'ютерах використовується розподіл інтенсивності протяжних джерел світла. Вони не можуть здійснювати просторово-частотну фільтрацію, проте для операцій просторово-частотної кореляції вони часто виявляються більш простими, ніж когерентні.

Принципові переваги оптичних комп'ютерів – паралельність роботи, подання даних у вигляді двовимірних образів, комутація у вільному просторі – виявляються найчастіше не конкурентноздатними повною мірою через високий технологічний рівень напівпровідникових надвеликих інтегральних схем. Тому найбільший ефект досягається в системах, в яких оптика використовується тільки для комутації. Архітектура таких систем основана на таких принципах масової обробки, як обчислювальні середовища, клітинні структури, систолічні матриці. У поєднанні з комутацією у вільному просторі отримується нова якість – надвисока продуктивність. Проте у технологічному плані такі системи істотно поступаються методам мікроелектроніки.

Основні принципи побудови оптичних комп'ютерів добре відпрацьовані з використанням газових лазерів або інших джерел світла. Однак останні досягнення гетероелектроніки, які дозволяють створювати точкові джерела світла й електронів з високими оптичними і часовими параметрами, обумовлюють використання високих технології мікро- і наноелектроніки для побудови обчислювачів, конкурентноздатних з транзисторними мікропроцесорами не тільки за швидкістю обчислень, а і за всіма техніко-економічними показниками.

### 6.3 Гетеролазерні та квантоворозмірні технології

Для сучасної інформаційної техніки характерні два магістральних напрямки побудови обчислювальних пристроїв: на основі транзисторних елементів кремнієвої мікроелектроніки і на основі принципів гетероелектроніки. Ключовими елементами гетероелеткроніки є гетеролазери, які мають зараз таке саме революційне значення в технологіях обробки сигналів, яке у свій час мали транзистори, мікросхеми і мікропроцесори.

Ідея використання в напівпровідникових лазерах гетеропереходів належить Ж. І. Алфьорову і Р. Ф. Казарінову, які у 1962 р. у фізико-технічному інституті ім. А.Ф. Іоффе винайшли подвійну гетероструктуру.

Відтоді почалися інтенсивні розробки нових структур і матеріалів для лазерів, світлодіодів та інших приладів на гетероструктурах. Основним фізико-технологічним принципом створення якісних гетероструктур є збіг параметрів кристалічних ґрат епітаксіальної плівки і підкладки, на якій вона росте. Найбільш придатною парою напівпровідникових матеріалів виявилися арсенід галію і твердий розчин арсеніду галію-алюмінію, які випромінюють у ближній інфрачервоній і прилеглій червоній областях спектра. Однак рівень технології того часу не дозволяв одержати лазери, які працюють при кімнатній температурі в безперервному режимі.

Перші світлодіоди на твердих розчинах InGaAsP були отримані в 1964 році. Основними матеріалами оптоелектроніки в наш час є багатокомпонентні тверді розчини в системі InGaAsP, уперше введені в електроніку в 1966 р. Найдивнішим виявилося те, що інтенсивність випромінювання діодів на InGaAsP найчастіше перевищувала інтенсивність аналогічних діодів на арсеніді галію і фосфіді індію, отриманих за тією ж технологічною схемою. Довжина ж випромінюваної оптичної хвилі відповідала оптичним переходам, які істотно перевищують ширину забороненої зони. Через 15 років, у 1981 р., використовуючи сучасне розуміння квантово-розмірних ефектів у квантових ямах, пояснили це явище квантуванням рівнів у таких гетерогенних напівпровідниках. Це були перші наноструктури з квантуванням енергії електронів у квантоворозмірних ямах. Характерно, що саме в багатокомпонентних матеріалах, які мають чотири та більше сортів атомів, які суттєво

відрізняються за своїми фізико-хімічними властивостями в умовах природної кристалізації, утворюються квантові ями, квантові точки, квантові дроти, оптичні мікрооб'єми (cavity) та фотонні кристали.

Уперше лазерний ефект у багатокомпонентній системі InGaAsP був отриманий у 1965 році. Надалі, на основі твердих розчинів InGaAsP були розроблені лазерні і фотоприймальні елементи на довжини хвиль 1,3 і 1,55 мкм для волоконно-оптичних ліній зв'язку, у тому числі для надшвидкісних комп'ютерних мереж. Швидкісні і надшвидкісні лазери на InGaAsP для ВОЛС зараз займають положення лідера і складають приблизно 70% обсягу на ринку всіх типів напівпровідникових, твердотільних і газових лазерів. Сучасні гетеролазери на основі InGaAsP або інших матеріалів являють собою багатошарові структури з активною областю з електронним і оптичним обмеженням, створюваним відповідним вибором складів шарів. Цілком освоєний видимий і інфрачервоний діапазони. Успішно розробляються лазерні діоди на основі селеніду цинку і нітриду галію для синьо-зеленої і фіолетової областей спектра. Квантові ями, квантові нитки і квантові точки являють собою приклади квантування станів електронів у двовимірному (2D), одновимірному (ID), нульвимірному (OD) просторі, відповідно.

У 1981 р. вперше проведена класифікація гетерогенних матеріалів у залежності від розмірів $r$ мікро-, нанообластей з однаковою шириною забороненої зони:

- $r \approx (3 - 10) \cdot a \approx (1,5 - 5)$ нм – квазігомогенні тверді розчини; у сучасному розумінні це гетероструктури з квантовими точками;

- $r \approx (20 - 50) \cdot a \approx (10 - 30)$ нм – "надрішітчаті" гетерогенні тверді розчини; у сучасному розумінні це гетероструктури з квантовими ямами;

- $r \approx (0,1 - 10)$ мкм – оптично гетерогенні тверді розчини; у сучасному розумінні це фотонні матеріали.

Згодом були отримані оптично гетерогенні напівпровідники з розмірами мікрообластей порядку довжини хвилі фотонів. Вони являють собою структури з мікрооб'ємами, що обмежують (утримують) фотони (optical wavelength - scale structures or microcavities: confined photons). Такі матеріали отримали назву фотонних кристалів, PBG (Photonic bandgap materials). У цих матеріалах можна реалізовувати проходження світла без

втрат. Це дозволяє створювати світлодіодні структури з рекордно високою ефективністю перетворення електричної енергії в оптичну і будувати на їх основі функціональні оптоелектронні елементи обробки і передачі інформації.

Структури на основі квантових ниток і квантових точок дозволяють реалізувати одномодовий світлодіодний режим. Він має когерентні властивості лазерів, але характеризується більшою надійністю і відсутністю порога генерації. Такі світлодіоди мають швидкість модуляції більшу за 10 ГГц і диференціальну квантову ефективність більшу за 50%. Фактично в таких структурах втрачається різниця між світлодіодом і лазером і стає реальністю безпороговий лазер.

Останнім часом інтенсивно розвивається електронна оптика в конденсованих середовищах. У квантово-розмірних структурах існує чітка аналогія між оптикою та електронікою. Двовимірний канал в арсенід-галієвому польовому транзисторі з гетеропереходом являє собою електронний хвильовід, в якому можлива колімація кількох енергетичних електронних пучків, фокусування і відбиття електронів. Тунелювання електронів через бар'єр еквівалентне проходженню хвиль в оптиці. Електронний резонатор Фабрі-Перо фактично реалізується в двобар'єрному резонансному тунельному діоді.

Спостерігається і зворотна аналогія, наприклад, фотонні матеріали та проходження квантів світла через вузьку апертуру. Хоча корпускулярно-хвильовий дуалізм електронів давно використовується у вакуумних лампах і електронних мікроскопах, маніпуляції з електронами в конденсованих середовищах є дуже перспективними для наноелектроніки. Хвильова і балістична поведінка електронів у напівпровідникових, особливо в гетерогенних, матеріалах викликає додаткові можливості інтеграції в мікроелектроніці.

Процеси електронної літографії фактично призначені для створення мікро- і наностуктур на поверхні та в об'ємі напівпровідника для обмеження руху електронів у небажаних напрямках та їх спрямування в обраних. Керування рухом електронів здійснюється зовнішніми потенціалами через фіксовані структури мікросхеми. При цьому потік електронів розглядається як безупинний рух частинок, без врахування їх

хвильових властивостей, які, за аналогією з оптикою, визначають граничну роздільну здатність вакуумних електронних систем (мікроскопів, електронних літографів).

Хвильова природа електрона і використання кінцевих апертур α для обмеження ширини електронного пучка призводять до розсіювання пучка, що пройшов об'єкт (дифракційна помилка). Радіус нерізкості, обумовлений дифракцією при малих кутах, дорівнює

$$r_g = \frac{0.61\lambda}{\alpha},$$

де $\lambda$ - довжина хвилі де Бройля.

Граничне розрізнення $\delta$ обмежується сферичною і дифракційною помилками і може бути виражене через довжину хвилі електрона і постійну сферичної аберації $C_{сф}$:

$$\delta_{мин} = A\lambda^{3/4} C_{СФ}^{1/4}.$$

Принциповим обмеженням зменшення значення $\delta_{мін}$ є дефокусування, яке досягає довжини хвилі електрона, що дорівнює кільком ангстремам. Використовуючи електронні хвилі, можна на кілька порядків підвищити просторову роздільну здатність класичних оптичних методів обробки інформації, яка визначається довжиною хвилі фотонів (у реальних системах вона складає 0,2 – 1 мкм).

### 6.4 Функціональний оптрон

Аналізуючи процеси оптоелектронних перетворень в оптронах на початку 70-х років, В. І. Осінський запропонував проводити функціональну обробку інформації в багатошарових структурах варізонних напівпровідників. Ідея основана на тому, що у варізонному кристалі існує внутрішнє електричне поле, під дією якого відбувається рух електронів і дірок. При цьому шари напівпровідника здатні поглинати і випромінювати оптичні сигнали з різними довжинами хвиль, перетворюючи їх у потік електронів і дірок, спрямований до вузькозонної області.

Схема оптичних і електронних переходів у кристалі з градієнтом

забороненої зони подавалася деяким функціональним оптроном, у якому умовно можна виділити вхідну область *I*, вихідну область *II,* і область передачі або оптичного, або електронного зв'язку *III*. Схема, наведена на рис. 6.1, а, відповідає оптрону з прямим зв'язком. При зміні вхідного світлового потоку $Ф_1$ змінюється інтенсивність генерації електронно-діркових пар. Нерівноважні носії заряду переносяться через область зі змінною шириною забороненої зони і потім рекомбінують в області *II,* створюючи вихідний світловий потік $Ф_2$, амплітуда якого є функцією вхідного світлового потоку $Ф_1$. Область електронно-діркового переносу *III* служить передавальним середовищем і може керуватися електричним полем або світлом. Такий оптрон є функціональним підсилювачем або перетворювачем світла. В області *III* можуть бути сформовані наноструктури квантових ниток, точок, електронні хвилеводи типу каналів з двовимірним електронним газом або електронні лінзи та дзеркала.

Режим підсилення й антистоксівського перетворення можна реалізувати в схемі, поданій на рис. 6.1, б. При антистоксівському перетворенні енергія випущених квантів більша за енергію вхідного сигналу $h\nu_2 > h\nu_1$, тому за певних умов відбувається підсилення потужності. Додаткова енергія передається носіям за рахунок зовнішнього електричного поля або градієнта концентрації. У цих двох видах функціональних оптронів оптичний зв'язок є зовнішнім.

Для реалізації внутрішнього оптичного зв'язку область передачі не повинна поглинати рекомбінаційне випромінювання, що виникло на вході, який електрично розв'язаний з виходом. Схема, наведена на рис. 6.1, в, показує можливий варіант реалізації структури з максимумом забороненої зони в області передачі. Товщина області передачі, через яку здійснюється як прямий, так і зворотний оптичний зв'язок, складає кілька дифузійних довжин.

Легко помітити, що варіант функціонального оптрона з внутрішнім оптичним зв'язком (рис. 6.1 в) є комбінацією оптоелектронних структур (рис. 6.1, а,б). В області передачі сигналу може бути здійснена інверсія населеностей. Вибором напрямку дії зв'язку через стимулювання випромінювання реалізується як позитивний, так і негативний оптичний зв'язок.

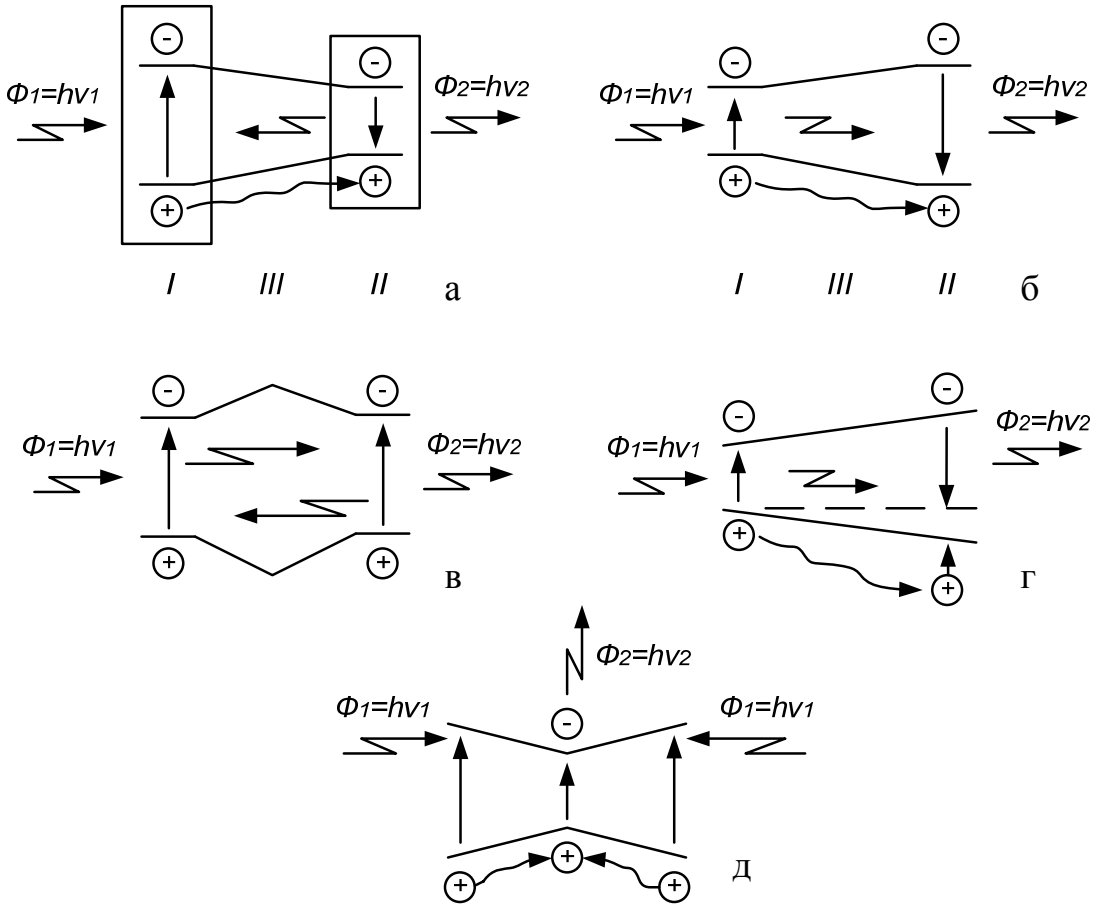



Рисунок 6.1 – Оптичні електронні (діркові) переходи у функціональних оптронах на напівпровідниках із градієнтом забороненої зони: а - вхідний широкозонний бік; б - вхідний вузькозонний бік; в - оптичний зв'язок через область передачі з максимумом забороненої зони; г - оптичний зв'язок через домішковий рівень (рівень пасток); д - широкозонні області служать оптичними входами, загальна вузькозонна область - оптичним або електричним виходом.

Оптичний зворотний зв'язок може проходити через рівень пасток (рис. 6.1, г). Прямий електронний (дірковий) зв'язок між входом і виходом оптрона створює в області *II* надлишкову концентрацію неосновних носіїв, які захоплюються пастками і випромінювально рекомбінують з енергією квантів домішкової смуги $h\nu_{ПР} = E_C - E_Л > h\nu_1$. Якщо реабсорбація домішкового випромінювання відбувається в області порядку дифузійної довжини, зворотний зв'язок носить оптоелектронний характер.

На рис. 6.1, д подана діаграма оптичних і електронних переходів в оптроні, виходом якого є вузькозонна область кристала, а входи можуть реалізовуватися через усі широкозонні області.

Усі наведені варіанти функціональних оптронів мають оптичні входи і виходи. Проте можна здійснити й електричний вхід, якщо помістити кристал з градієнтом забороненої зони між обкладками конденсатора. Робота функціональних оптронів на кристалах зі змінною забороненою зоною супроводжується перетворенням спектра випромінювання і використанням різкого розходження коефіцієнтів поглинання певних областей монолітної структури.

Наведені міркування можна поширити на більш складні структури, у яких одна з областей або всі області кристала зі змінною забороненою зоною містять квантові точки або ями, мікролазерні або світлодіодні структури, мікро- і нанофотоприймачі будь-якого типу або інші мікро- і наноструктури. Наприклад, область передачі в схемі з максимумом забороненої зони може містити *i*-шар або *p*-*n*-перехід. Усі наведені на рис. 6.1 елементарні схеми мають оптичний вхід та вихід. При введенні *p*-*n*-переходів або інших електронних структур оптрони можуть мати електричні входи і виходи, кількість яких визначається реалізованою функцією.

### 6.5 Надшвидкісні квантові нанопроцесори

При роботі з двовимірними інформаційними потоками існують дві можливості розпаралелювання процесу обробки: перетворення зображень у паралельних просторових каналах і паралельна обробка оптичних сигналів з різними довжинами хвиль. В обох випадках можлива обробка як цифрової, так і аналогової інформації. При цифровій обробці на вхід функціональної мікроструктури подається світлове поле, що містить $10^3$-$10^4$ біт (сторінка дискретної інформації). При аналоговій обробці на вхід надходять просторові зображення (образи), які доцільно обробляти на основі асоціативних принципів аналогової двовимірної лінійної обробки когерентних або некогерентних сигналів.

Принциповою перевагою функціональної обробки в шарах зі змінною забороненою зоною є можливість перетворення сигналів у

реальному масштабі часу, тобто практично миттєво за час ~$10^{-9}$-$10^{-8}$с.

Ряд задач розпізнавання образів, керування складними системами, задачі метеорології, математичної фізики можна вирішити тільки двовимірною і тривимірною обробкою інформації в реальному масштабі часу. При цьому потрібна швидкодія більша за $10^{10}$ операцій за секунду, яку неможливо реалізувати в ЕОМ на транзисторних елементах. Лише двовимірні і тривимірні системи обробки інформації в реальному масштабі часу забезпечують практично миттєве перетворення великих масивів інформації у вигляді просторових зображень.

Припустимо, що на поверхню пластини напівпровідника з градієнтом забороненої зони надходить оптичний сигнал у вигляді двовимірного просторового рельєфу інтенсивності $\Phi_0(x, y)$. У шарі $dz$ це світлове поле поглинається, генеруючи електронно-діркові пари. Просторовий рельєф інтенсивності $\Phi_0(x, y)$ перетвориться в рельєф заряду електронів $Q_n(x,y)$ і дірок $Q_p(x,y)$. Під дією вбудованого внутрішнього поля просторові рельєфи $Q_n$ і $Q_p$ змінюються відповідно до функції перетворення. У найпростішому випадку припустимо, що є симетрична структура, аналогічна наведеній на рис. 6.1, а. У ній через амбіполярний дрейф носіїв під дією внутрішнього поля, обидві картини (електронна і діркова) будуть переміщатися до вихідної області, де вони додаються. Якщо всі параметри для ансамблю електронів і дірок однакові (у межах похибки методу), то вихідний сигнал буде являти собою просторовий рельєф, що описується функцією $\Phi_2(x,y)$, яка є розв'язком рівняння

$$A \cdot \Phi_0(x,y) = \Phi_2(x,y),$$

де $A$ – оператор, тобто математична дія, яка здійснюється в структурі над вхідним сигналом.

На виході структури образ можна обробляти (розпізнавати) як єдине ціле або провести його дискретизацію за будь-якою ознакою для подальшого послідовного або паралельного введення в наступний дискретний обчислювач, в якому проводиться інша операція, описувана оператором $B$ і т.д. Перетворення в електричні сигнали проводиться матрицею фотоприймачів, сформованою безпосередньо на виході структури. Струм фотоприймальних елементів аналізується логічними

схемами по черзі. При цьому в залежності від програми аналізу і характеру виведення інформації (послідовного або паралельного) кількість логічних кроків складає значну величину, яка при послідовному аналізі однієї сторінки в ЕОМ дорівнює $10^3$-$10^4$ крокам.

Описуваний спосіб функціональної обробки дозволяє суттєво скоротити кількість логічних кроків і максимально використовувати переваги паралельної обробки інформації, оскільки операції здійснюються одночасно над великим набором чисел, які характеризують первинні ознаки вхідного просторового світлового потоку.

Відзначимо, що розглянутий спосіб аналогічний способу оптичної просторової фільтрації, проте на відміну від нього здійснюється у реальному масштабі часу. Час перетворення сигналів скорочується за рахунок запрограмованих у структурі оптичних і електронних зв'язків та високої швидкості їх реалізації, яка для класичних структур на основі арсеніду галію складає $10^{-9}$ с, а для квантових - $10^{-12}$ с.

Пройшовши область дрейфу, носії надходять у коло формування вихідного сигналу. Передавальна характеристика двовимірного оптичного сигналу, адекватно перетвореного в електронний рельєф, визначається дифузійно-дрейфовим механізмом переносу. Її можна оцінити за співвідношенням

$$H(f_x) = \left(1 - \frac{exp(\alpha d)}{1 + \alpha L}\right) \Bigg/ \left(1 - \frac{exp(-\alpha d)}{1 + \alpha L}\right),$$

де $\frac{1}{L^2} = \frac{1}{L_0^2} + (2\pi f_x)^2$ - дифузійно-дрейфова довжина неосновних носіїв;

$L_0 = L_{др}$;

$d$ - товщина області дрейфу;

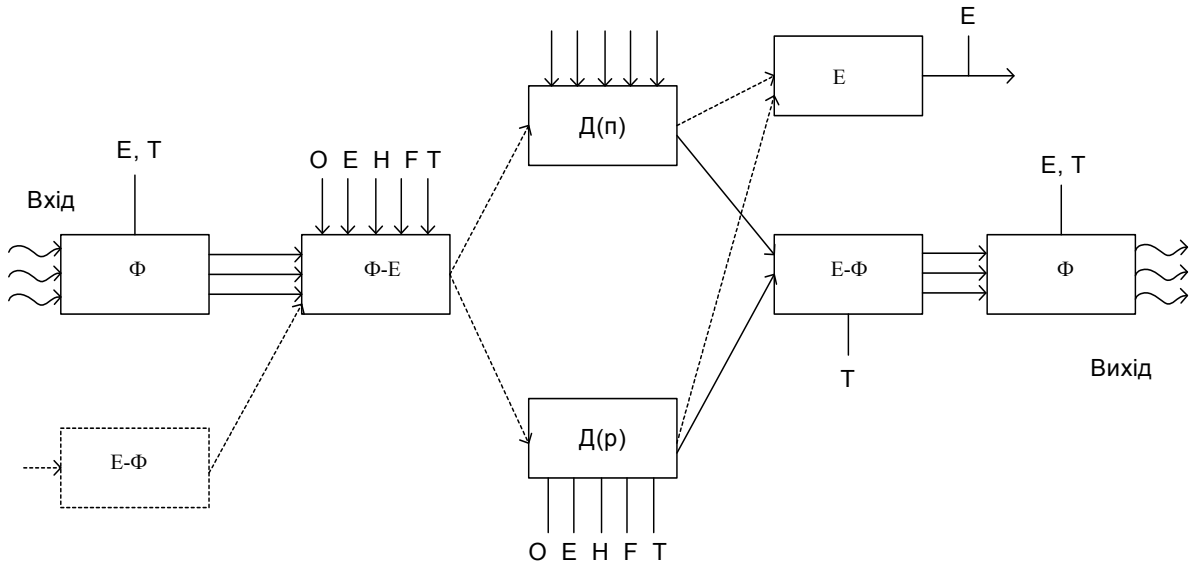
$\alpha$ - усереднений коефіцієнт поглинання.

Для кроку $p$ = 10 мкм, $f_{s\,\max} = 1/2p$ = 50 мм$^{-1}$, $L_0$ = 10 мкм і $a = 10^4$ см$^{-1}$ одержуємо $H(f_{s\,\max}) = 0{,}65$.

В електронному колі передачі доцільно провести стиснення сигналу до розмірів, які визначаються роздільною здатністю електронних систем, тобто до розмірів порядку довжини хвилі електронів у кристалі

напівпровідника, яка складає приблизно 0,1 нм. Процес обробки сигналів буде відбуватися в наноструктурах електронної ланки на 3 - 4 порядки скоріше у порівнянні зі структурами мікропроцесорів на транзисторних вентилях і на 6 - 8 порядків швидше у порівнянні з класичними оптичними процесорами, що використовують дискретні лазери та оптичні лінзи.

Якщо в квантовому нанопроцесорі вихідним є оптичний сигнал, у вихідному шарі необхідно забезпечити просторову декомпресію та ефективну випромінювальну рекомбінацію. Якщо ж вихідними є електричні сигнали, вони формуються в колах зовнішніх джерел струму, в які включаються області формування вихідних сигналів. Отримання необхідної амплітуди сигналів досягається їх підсиленням у матриці нанотранзисторів або в підсилювачах світла.




Ф-ланка оптичної фільтрації фотонів; Е - ланка електричного струму; Ф-Е - ланка фотон-електронного перетворення.

Рисунок 6.2 – Структурна схема квантового нанопроцесора. Стрілками показане введення алгоритмів функціональних перетворень впливом світловим O, електричним E, магнітним H, акустичним F і температурним T полями

Процес обробки інформації в такому нанопроцесорі зручно простежити за структурною схемою, яка зображена на рис. 6.2. Як і у випадку послідовної обробки, для аналізу паралельної обробки інформації

структура розбивається на ряд ділянок, у кожній з яких відбувається фізична взаємодія ансамблю носіїв інформації - електронів і фотонів - зі спеціально вирощеними неоднорідностями складу твердого розчину. Крім такої запрограмованої зміни властивостей середовища, у різних ділянках можна діяти на характеристики зовнішніх сигналів. Таким чином можна впливати на вхідну функцію різними операторами перетворення, що зберігаються в окремих елементах пам'яті, побудованих на масиві квантових ям або точок. З'єднання квантових нанопроцесорів з пам'яттю для збереження операторів дозволяє реалізувати функціональні оптоелектронні обчислювачі, що за своєю продуктивністю та технологічністю суттєво перевершують транзисторні мікропроцесори.

У більш загальному випадку множини оптичних сигналів, кожний з яких характеризується своєю довжиною хвилі, на вхід багатошарової структури подаються світлові поля, які, з урахуванням коефіцієнтів відбиття R(x,y,X), описуються комплексними функціями вигляду

$$\sum \Phi(x,y,\lambda) = \sum_{\lambda=1}^{\lambda=a} \Phi_0(x,y) exp[i\varphi(x,y)][1 - R(x,y,\lambda)]$$

де $\lambda = (\lambda_{мах} - \lambda_{min})/\Delta\lambda$ - кількість спектральних каналів, що можуть розміститися в діапазоні довжин хвиль, які поглинаються шарами з різною $E_g$.

Вхідний шар являє собою просторовий оптичний фільтр. Якщо модуляційна характеристика фільтра виражається як *T(x,y)*, то після проходження фільтра спектр сигналу для однієї довжини хвилі приймає вигляд

$$\Phi_1(x,y) = \Phi(x,y)T(x,y)$$

Вирощуючи епітаксійну плівку з відповідним розподілом оптичних констант, наприклад, показника заломлення, можна синтезувати таку перехідну оптичну характеристику вхідного шару, щоб у ньому здійснювалося необхідне перетворення оптичного сигналу.

Оскільки вхідна ланка є просторовим оптичним фільтром, у ньому можливо як пряме

$$F(\Phi) = \Phi\left(f_x^{\lambda}, f_y^{\lambda}\right) = \int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int \Phi(x, y)\exp\left[-i2\pi\left(f_x^{\lambda}x + f_y^{\lambda}y\right)\right]dxdy\,,$$

так і обернене перетворення Фур'є:

$$F^{-1}(\Phi) = \Phi(x, y) = \int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int \Phi\left(f_x^{\lambda}, f_y^{\lambda}\right)exp\left[-i2\pi\left(f_x^{\lambda}x + f_y^{\lambda}y\right)\right]df_x^{\lambda}d\,f_y^{\lambda}$$

де $f_x^{\lambda}$ і $f_y^{\lambda}$ - просторові частоти для всіх довжин хвиль вхідного сигналу.

Зазначемо, що в окремому випадку некогерентного оптичного сигналу інформація закладена в інтенсивності світлової хвилі, під дією якої на глибині z в одиницю часу генерується *g(x,y,z)dz* електронно-діркових пар. Функція генерації *g(x,y,z)* для напівпровідника з постійною $E_g$ виражається експонентою, а для напівпровідника з лінійним градієнтом $E_g$ - дзвоноподібною залежністю. Синтезуючи функції генерації, можна здійснити задані перетворення сигналів. Різні функції генерації реалізуються програмною зміною складу напівпровідникового твердого розчину і, отже, коефіцієнта поглинання. Оскільки функція генерації визначається коефіцієнтом поглинання, його значення можна змінювати електричним або температурним полем. Крім того, просторовий розподіл генерованих електронно-діркових пар легко змінювати світловим полем тієї ж або іншої, ніж основний сигнал, довжини хвилі, магнітним, електричним або акустичним полями.

Генеровані електрони і дірки створюють повний електричний заряд, щільність якого відповідно до рівняння Пуассона дорівнює

$$\rho(x, y, z) = div\,D\,,$$

де $D = \varepsilon\varepsilon_0 E$ - електрична індукція;

$\varepsilon$ - діелектрична проникність матеріалу;

$\varepsilon_0$ - діелектрична проникність вакууму;

$E$ - напруженість електричного поля.

Електрони і дірки під дією внутрішнього поля, обумовленого градієнтом $E_g$, дрейфують у вузькозонну частину кристала. На дрейф

електронів і дірок роздільно можна впливати як заздалегідь заданим законом розподілу внутрішнього поля, так і вводячи відповідні алгоритми функціональних перетворень фізичними впливами, зручними для технічної реалізації.

Особливість вхідного шару з градієнтом $E_g$ полягає в тому, що в ньому можлива фільтрація за довжиною хвилі, тобто функція пропускання залежить від λ: $T(x,y)$= T'(λ). Для немонохроматичного вхідного сигналу

$$\Phi(x,y,\lambda)=[\Phi(x,y)]T'(\lambda).$$

У колі оптичної просторової фільтрації можливе введення алгоритмів обробки зовнішнім електричним полем або зміною температури. У принципі можливі й інші фізичні впливи, однак дія оптичних сигналів, магнітного й акустичного полів змінюють характеристики пропускання напівпровідників дуже мало.

Прикладання електричного поля до напівпровідника змінює край фундаментального поглинання в

$$K/K_0 = 1 + \varphi(h\nu,E) \text{ раз},$$

де $K_0 = A\cdot(R\nu - Eg)^{1/2}$ - коефіцієнт поглинання прямозонного напівпровідника без електричного поля;

$A$ – параметр, який визначається через константи матеріалу і слабко залежить від енергії фотонів;

$\varphi$ - функція, що обчислюється через інтеграли Ейрі і є функцією енергії фотонів і електричного поля.

Накладення температурного поля змінює край поглинання в бінарних з'єднаннях пропорційно температурній зміні $E_g$, який дорівнює

$$E_g = E_g(0) - \alpha T^2/(T+\theta)$$

де $a$ - емпірична константа;

$\theta$ — дебаєвська температура при температурі абсолютного нуля.

Вихідний сигнал є результатом функціональної обробки при проходженні сигналу через систему з передавальною функцією

$$H(f_x, f_y) = \left[H_1(f_x, f_y) H_2(f_x, f_y)\right] H_3(f_x, f_y)$$

Для наочності покажемо, як за допомогою функціональних квантових процесорів на напівпровідниках з градієнтом ширини забороненої зони можна виконувати деякі математичні операції.

1. Додавання сигналів $\Phi_1(x, y, \lambda)$ і $\Phi_2(x, y, \lambda)$ здійснюється подачею на структуру (рис. 6.1, д) обох сигналів за час, набагато менший за час дрейфу носіїв до області реєстрації.

2. Добуток двох сигналів здійснюється в структурі, у якій один сигнал створює дрейф електронів, а інший дрейф дірок. Тоді на виході одержимо сигнал, пропорційний добутку їхніх концентрацій. Подаючи цей сигнал на вхід *I*, а інший (третій) сигнал на вхід *II*, можемо послідовно одержати результат множення трьох сигналів і т.п. Коефіцієнт пропускання тракту проходження оптичного сигналу необхідно змінювати іншими сигналами за законом, який визначається функціями, що перемножуються. Для цього зручно скористатися ефектом Франца-Келдиша з пропорційним керуванням світлом.

3. Диференціювання одновимірного сигналу $\Phi(x, y)$ можна здійснити, використовуючи співвідношення (для одновимірного випадку):

$$\Phi = \int f(x) exp(-i2\pi f_x) dx = -i2\pi f_x S(f_x)$$

З наведеної формули витікає, що треба сформувати Фур'є-образ S вхідного сигналу і потім помножити його $f_x$. Множення можна здійснити описаним вище способом.

4. Інтегрування сигналу здійснюється при його фотон-електронному перетворенні в заданих межах:

$$I(t) = a \int_{l_x} \int_{l_y} \Phi(x, y) Q(x, y) dxdy$$

де t - час інтегрування;

$l_x$ і $l_y$ - контури вхідного світлового поля;

*a* - постійна.

Межі інтегрування визначаються зоною обробки сигналів, яка може

залишатися постійною або змінюватися. Якщо зона обробки змінюється в часі в процесі обробки, то можна отримати розгорнення процесу обробки в часі, якщо швидкість запису сигналу більша за швидкість зміни зони обробки.

5. Розпізнавання образів зводиться до виділення з вхідного сигналу, який містить корисний і сторонній сигнали, лише корисної його частини. Для цього розпізнаваний образ подається на вхід *I* структури рис. 6.1, д, а образ порівняння – на вхід *II*. При збігу образів селективний детектор на виході зареєструє великий світловий сигнал, тоді як при відсутності розпізнаваного образу величина сигналу буде малою.

Наведені приклади лише демонструють переваги функціональної обробки інформації в квантових нанопроцесорах зі змінною забороненою зоною і не розкривають усього різноманітність можливих їх застосувань.

Описаний вище принцип формування придатний як для некогерентних оптичних сигналів, так і для когерентних. У другому випадку у вхідній площині структури може бути сформована інтерференційна картина оброблюваного зображення, що існує у вигляді рельєфу ансамблю електронів і дірок і під дією внутрішнього поля переміщується до вузькозонної частини напівпровідника, де перетвориться в оптичний або електричний сигнал.

Відомо, що інтерференційні ґрати на вільних носіях у кремнії не привели до практичного застосування напівпровідників як середовищ, що реєструють, через малий час існування зображення в порівнянні з часом реєстрації. Поєднання оптичного реєструвального середовища квантоворозмірних електронних наноструктур і пікосекундних приймачів в одному монокристалі квантового нанопроцесора зі змінною забороненою зоною відкриває широкі можливості для голографічної обробки інформації в реальному масштабі часу.

Як випливає з наведеного аналізу для створення внутрішнього поля $E = q1Eg/dx$ для електронів потрібно створювати градієнт краю зони провідності, тоді як для дірок – градієнт краю валентної зони. Технологічно це може бути досягнуто зміною змісту у твердому розчині атомів третьої (п’ятої) груп у потрійних твердих розчинах або чотирьох сортів атомів у системах типу InGaAsP. Епітаксіальна технологія повинна забезпечувати

широкий діапазон товщин, від сотні мікронів до одиниць нанометрів. Це вимагає досить складного поєднання різних епітаксіальних технологій і комп'ютерного керування процесами росту. Однак оцінки показують, що економічно це доцільніше ніж створення надвеликих інтегральних схем на транзисторних вентилях з нанометровими розмірами елементів. Більш того, функціональні квантові нанопроцесори дозволяють зняти фізичні і техніко-економічні обмеження мікропроцесорів на транзисторних вентилях, що виникають при необхідності обробки надвеликих інформаційних потоків у реальному масштабі часу.

**Контрольні питання**

1. Охарактеризуйте фізико-технологічні обмеження, які перешкоджають подальшому розвитку традиційної мікроелектроніки.
2. Які нові технології можуть забезпечити подальший розвиток електронно-обчислювальних засобів? Розкрийте суть кожної з них.
3. Які підходи можуть бути використані для створення квантового комп'ютера? Розкрийте суть кожного з них.
4. Назвіть основні елементи оптичного комп'ютера. Які основні функції вони виконують?
5. Розкрийте основні принципи, що лежать в основі способу високошвидкісної функціональної обробки інформації, який реалізується у квантових нанопроцесорах.
6. Які основні операції можуть бути виконані у квантових нанопроцесорах? Яким чином вони реалізуються?

## ЛІТЕРАТУРА


1. Акаев А. А., Майоров С. А. Оптические методы обработки информации. – М.: Высш. шк., 1988. – 237с.
2. Беляев В. Современные электронные дисплеи // Электронные компоненты. – 2002. – №1. – С. 24- 28.
3. В. Г. Вербицкий Ионные нанотехнологии в электронике. Монография. – К.: „МП Леся”, 2002.- 376 с.
4. Верещагин И. К Ведение в оптоэлектронику. – М.: Высш. шк, 1991. – 191 с.
5. Волоконно-оптичні структури комутації та передачі інформації. Навчальний посібник / В. П. Кожем’яко, С. В. Павлов, Т. Б. Мартинюк, Г. Л. Лисенко. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 106 с.
6. Гребнев А. К., Гридин В. Н., Дмитриев В. П. Оптоэлектронные элементы и устройства. - М.: Радио и связь, 1998. - 336 с.
7. Жека А. А., Батушкина Т. В. 200 практических схем генератора. Справочное издание. – Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1987.- 311 с.
8. Захаров С. М., Федоров В. Б., Цветков В. В. Оптоэлектронные интегральные схемы с применением полупроводниковых вертикально излучающих лазеров // Квантовая электроника. – 1999. – том 28, № 3. – С. 189–206.
9. Источники и приемники излучения / Г. Г. Ишанин, Э. Д. Панков, А. Л. Андреев, Г.В. Польщиков. – СПб.: Политехника, 1991. – 239 с.
10. Квазимпульсно-потенциальные оптоэлектронные элементы и устройства логико-временного типа/ Свечников С. В., Кожемяко В. П., Тимченко Л. И. – К.: Наук. думка, 1987. – 256 с.
11. Коган Л. В. Современное состояние полкпроводниковых излучающих диодов // Электронные компоненты. – 2000. - №2. – С. 22 - 27.
12. Кожем’яко В. П., Мартинюк Т. Б., Суприган О. І., Клімкіна Д. І. Квантові перетворювачі на оптоелектронних логіко-часових середовищах для око-процесорної обробки зображень. Монографія. - Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 126 с.

13. Кожем'яко В. П., Гаркушевський В. С., Петрук В. Г. Оптоелектронні системи і пристрої. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 100 с.
14. Кожем'яко В. П., Лисенко Г. Л., Суприган В. А. Схемотехніка побудови оптоелектронних інтегральних схем обробки інформації. Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2003. – 104с
15. Кожем'яко В. П., Готра З. Ю., Павлов С. В., Микитюк З. М., Готра О. З. Схемотехніка сучасного приладобудування. Частина 3. – Оптичні сенсори. Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 164 с.
16. Кожем'яко В. П., Тарновський М. Г., Павлов С. В. Схемотехніка сучасного приладобудування. Частина 4. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2003. – 135 с.
17. Кожем'яко В. П., Тарновський М. Г., Кожем'яко К. В. Оптико – електронна схемотехніка. Лабораторний практикум. – Вінниця: ВДТУ, 2001. – 99 с.
18. Оптоелектронні комп'ютери. Лабораторний практикум. / Т. Б. Мартинюк, В. П. Кожем'яко, С. В. Павлов, Н. І. Заболотна. – Вінниця: ВДТУ, 1998. – 71 с.
19. Оптоэлектронная схемотехника. Учебное пособие/ В. П. Кожемяко, О. Г. Натрошвили, Т. Б. Мартинюк, Л. Ш. Имнашвили. – К.: УМК ВО, 1988. – 276 с.
20. Осинский В. І., Бобков А. В. Квантоворазмерные гетерогенные излучающие структуры // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. - 2006. – №1(11). - С. 165-174.
21. Осинский В.И., Вербицкий В.Г. Зонная инженерия: ионная реализация виртуальных квантово-размерных гетероструктур наноэлектроники // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. - 2001. – №1. - С. 169-183.
22. Осинский В. И., Вербицкий В. Г., Ляхова Н. Н. Генерация белого излучения в наноструктурах многокомпонентных полупроводников. Abstracts of second International Scientific Conference on Optoelectronic Information Technologies, Vinnitsa, 23-25 Aprl. 2002, - P.85.
23. Паралельно-ієрархічне перетворення як системна модель оптико-електронних засобів штучного інтелекту. Монографія /

В. П. Кожем'яко, Ю. Ф. Кутаєв, С. В. Свєчніков, Л. І. Тимченко, А. А. Яровий. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 324 с.

24. Справочник по волоконно-оптическим линиям связи / Л. М. Андрушко, В. А. Вознесенский, В. Б. Каток и др. - Киев: Тэхника, 1988. – 239 с.
25. Схемотехніка сучасного приладобудування. Частина 1. Навчальний посібник / В. П. Кожем'яко, С. В. Павлов, О. К. Колесницький, І. М. Савалюк. – Вінниця: ВДТУ, 1999. – 144 с.
26. Схемотехніка сучасного приладобудування. Частина 2. Навчальний посібник / В. П. Кожем'яко, І. М. Савалюк, С. В. Павлов. – Вінниця: ВДТУ, 2000. – 152 с.
27. Техническое зрение роботов / В. И. Мошки, А. А. Петров, В. С. Титов, Ю. Г. Якушенков . – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
28. Трофимов Ю. Б. Полупроводниковые светодиоды – новые сферы применения и тенденции развития рынка // Электронные компоненты. – 2003. – №3. – С. 31 – 35.
29. Функціональні елементи і пристрої оптоелектроніки. Навчальний посібник / В. П. Кожем'яко, Л. І. Тимченко, Г. Л. Лисенко, Ю. Ф. Кутаєв. – К.: НМКВО, 1990. – 256 с.
30. Цирульник С. М. Математичне моделювання процесів в динамічному оптичному оперативному запам'ятовуючому пристрою на ВОЛЗ// Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2006. – №2(12). – С. 269-273.
31. Шмойлов В. И., Русын Б. П., Кузью М. Н., Капший О. В. Проектирование пульсирующих информационных решеток. – Львов: Меркатор, 2000. – 101 с.
32. Юшин А. М. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги. Справочник. Т.1.- М.: РадиоСофт, 1998.- 512 с.

*Навчальне видання*

**В. П. Кожем'яко, С. В. Павлов, М. Г. Тарновський**

# ОПТОЕЛЕКТРОННА СХЕМОТЕХНІКА

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено М. Г. Тарновським
Редактор В. О. Дружиніна
Коректор З. В. Поліщук

Видавництво ВНТУ „УНІВЕРСУМ-Вінниця"
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку
Формат 29,7×42 ¼
Друк різографічний
Тираж прим.
Зам. №

Гарнітура Times New Roman
Папір офсетний
Ум. друк. арк.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ