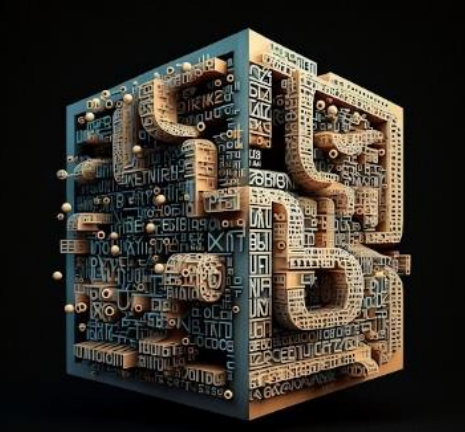


**Міністерство освіти та науки України
Харківський національний економічний
університет імені Семена Кузнеця**



**НАВЧАЛЬНО – НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
кафедра: Мультимедійних систем і технологій

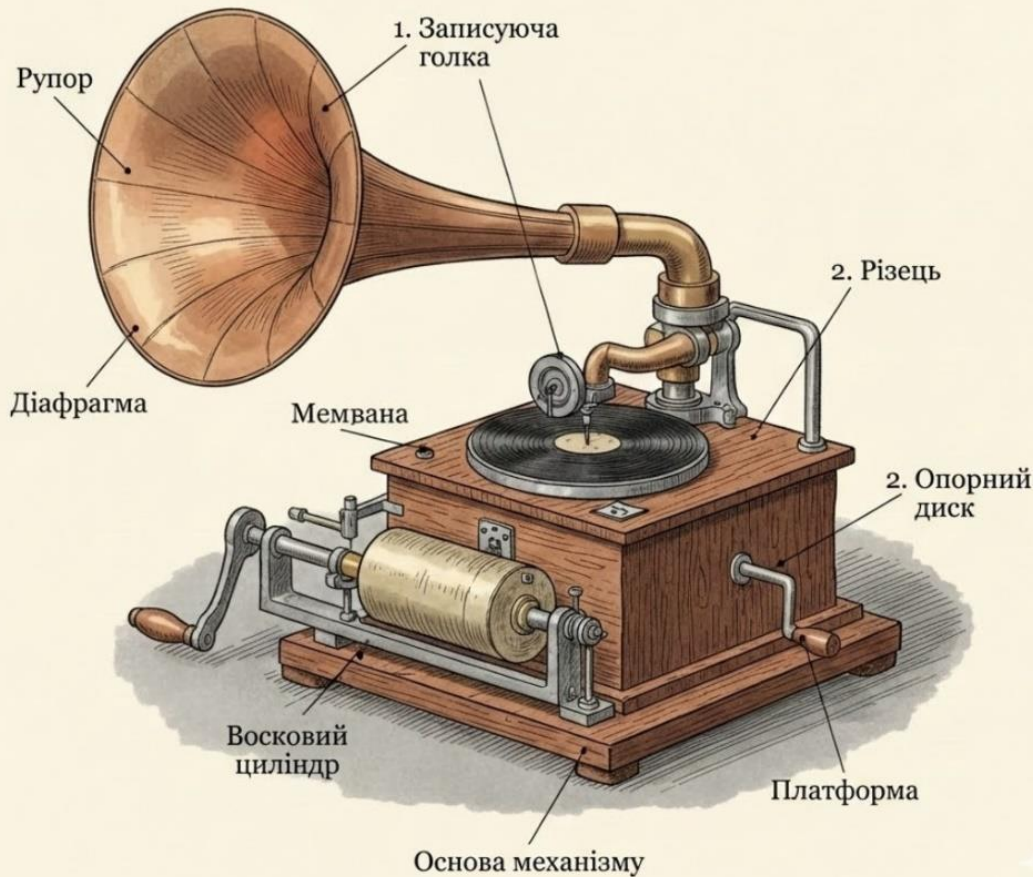
дисципліна
"ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ"
викладач: доцент, к.т.н.
Токарєв Володимир Володимирович



Тема.
Технології обробки мультимедіа.
Обробка аудіоконтенту.
(продовження)

Розглянемо докладніше системи звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

1. Механічна система звукозапису.



Даний малюнок «Механічна система звукозапису» являє собою деталізовану схему класичного фонографа. Схема ілюструє процес прямого аналогового запису звуку.

Опис компонентів системи:

1. Рупор. Акустичний пристрій конічної форми, призначений для концентрації звукової енергії. Він збирає звукові коливання з навколишнього середовища і фокусує їх на вузькому кінці, з'єднаному з діафрагмою.

2. Діафрагма. Тонка пружна перегородка (мембрана), яка сприймає акустичний тиск і перетворює його на механічні коливання. Це механічний аналог чутливого елемента сучасного мікрофона.

Розглянемо докладніше системи звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

3.Записуюча голка та Різець. Ці елементи жорстко пов'язані з центром діафрагми. Механічні коливання мембрани передаються на різець, який у реальному часі гравірує звукову доріжку на поверхні носія, що рухається.

4.Восковий циліндр. Змінний носій інформації. Зміна глибини або форми вирізаної на ньому канавки є фізичним відображенням (аналогом) звукового сигналу.

5.Опорний диск та Платформа. Вузли, що забезпечують фіксацію носія та його рівномірне обертання. Постійність швидкості обертання критично важлива для точності відтворення частоти записаного сигналу.

6.Основа механізму. Корпус, усередині якого розташовується привід (зазвичай пружинний), що забезпечує крутний момент.

Розглянемо докладніше системи звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

Дана система демонструє принцип **ізоморфізму** — коли фізичні властивості носія (рельєф воску) прямо відповідають фізичним властивостям сигналу (звуковому тиску).

Механічний запис — це процес фіксації звукових коливань шляхом фізичної деформації поверхні носія. Основний принцип полягає в **ізоморфізмі**. Геометрична форма звукової доріжки повинна бути аналогічна (подібна) формі звукової хвилі.

1. Етапи перетворення енергії цей процес механічного запису можна описати як ланцюг трансформацій. Звукові хвилі створюють змінний тиск **$P(t)$** у повітрі. Рупор концентрує тиск на діафрагмі, змушуючи її вібрувати з амплітудою, пропорційною тиску. Голка (різець) переносить ці коливання на рухомий носій (віск, лак, шелак), деформація якого фіксує сигнал.

2. Зміщення різця $z(t)$. Математична модель:

$$z(t) = k * P(t)$$

де: **$z(t)$** — просторове відхилення доріжки на носії;

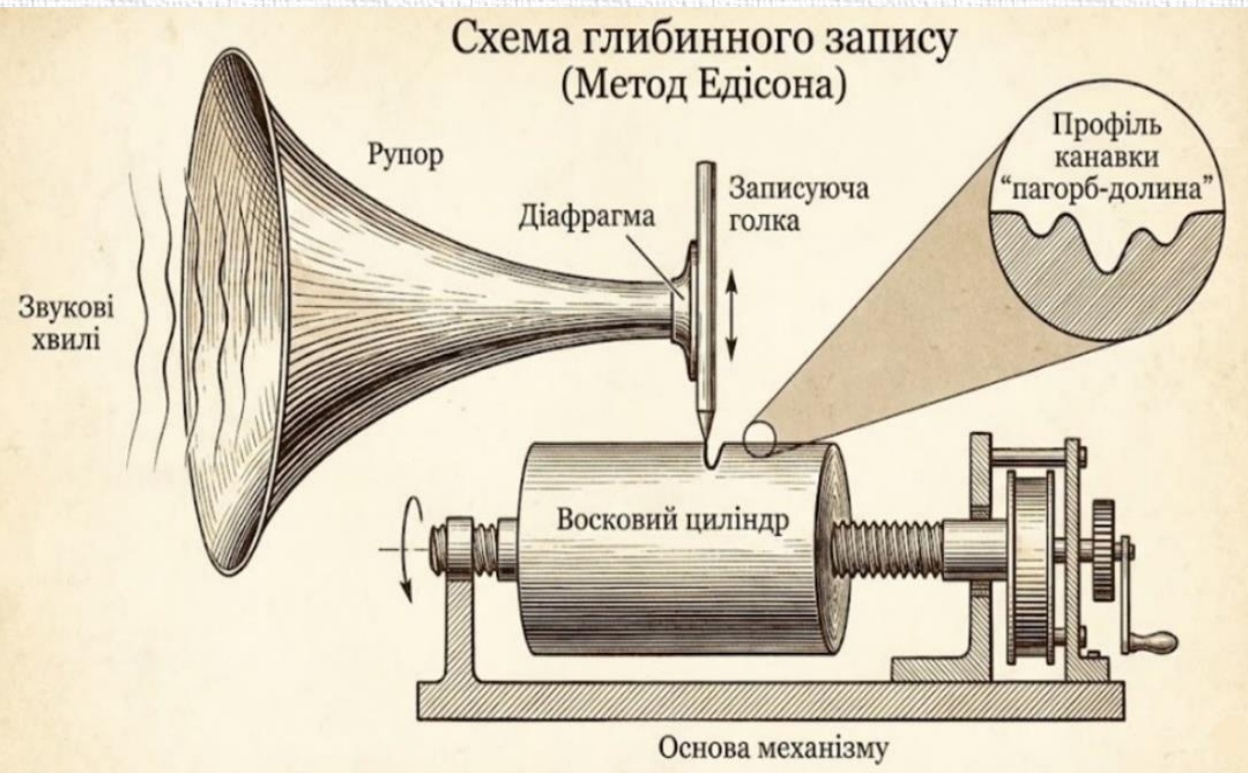
$P(t)$ — акустичний тиск;

k — коефіцієнт передачі механічної системи.



Розглянемо докладніше системи звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

Історично склалися два основні підходи до формування доріжки:
1. Глибинний запис (метод Едісона). Різець рухається перпендикулярно до поверхні, створюючи канавку змінної глибини. Використовувався у фонографах із восковими циліндрами.



Саме цей метод використовувався у перших фонографах **Едісона**. Його головним недоліком була висока чутливість до дефектів поверхні — будь-яка порошок на дні канавки сприймалася як гучне «тріщання», оскільки голка змушена була підскакувати на ній.

Розглянемо докладніше системи звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

Принцип роботи.

Формування доріжки. Канавка має змінну глибину. Коли звук гучніший, голка занурюється глибше, коли тихіший — піднімається. Якщо подивитися на доріжку в розрізі, вона нагадує «пагорби та долини» (hill and dale). Математична модель. Вертикальне зміщення голки $d(t)$ прямо пропорційне амплітуді звукового тиску.

Математична модель

$$d(t) = d_0 + A * \sin(\omega t)$$

де d_0 - базова глибина канавки;

A — амплітуда сигналу.

2. Поперечний запис (метод Берлінера). Різець рухається паралельно поверхні (**вправо-вліво**), створюючи звивисту канавку постійної глибини. Цей метод став **стандартом** для **грамофонних платівок та вінілу**.

Розглянемо докладніше системи звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

2. Поперечний запис (англ. lateral recording) — це метод механічної фіксації звуку, при якому різець коливається в горизонтальній площині (вправо-вліво) паралельно поверхні носія.

Поперечний запис (метод Берлінера)



Метод **Берлінера** став наступним еволюційним етапом у розвитку аналогових мультимедійних систем, що прийшов на зміну глибинному запису **Едісона**. На відміну від методу **Едісона**, де глибина канавки змінювалася, метод **Берлінера** передбачає створення канавки постійної глибини.

Звукова інформація кодується через геометричне відхилення дошки від центральної осі. Звукові коливання через діафрагму передаються на різець, який рухається горизонтально.

Розглянемо докладніше системи звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

На носії (грамплатівці) утворюється звивиста лінія, що нагадує «змійку». На зміну циліндрам прийшли плоскі диски (платівки), що значно спростило процес тиражування. У методі **Берлінера** відхилення канавки $s(t)$ є безперервною функцією часу, яка прямо пропорційна вхідному акустичному тиску. **Математична модель:**

$$s(t) = k * x(t)$$

$s(t)$ - геометрична деформація доріжки на носії як функція часу t . У методі поперечного запису — це амплітуда горизонтального відхилення різального інструменту від центральної осі доріжки.

k - коефіцієнт пропорційності або передавальна функція механічної системи. Ця величина визначає чутливість системи та залежить від пружності мембрани, маси та довжини важеля, що з'єднує мембрану з різцем. Опору матеріалу носія (воску або шелаку).

$x(t)$ - вхідний акустичний сигнал. Фізично він являє собою коливання звукового тиску, що діє на мембрану (діафрагму) записувального пристрою.

Це є класичним прикладом аналогового сигналу, де фізичний **рельєф** є моделлю звукової хвилі.

Розглянемо докладніше системи звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

Дана модель демонструє концепцію ізоморфізму, стан при якому структура запису повністю повторює структуру сигналу-джерела. Формула вказує на лінійну залежність. Це означає, що будь-яка зміна тиску $x(t)$ миттєво викликає відповідну зміну форми доріжки $s(t)$. Це забезпечує високу вірність відтворення, але лише в межах механічних можливостей системи.

Метод Едісона. Різець під дією $x(t)$ вдавлюється в матеріал, фіксуючи сигнал «вертикально».

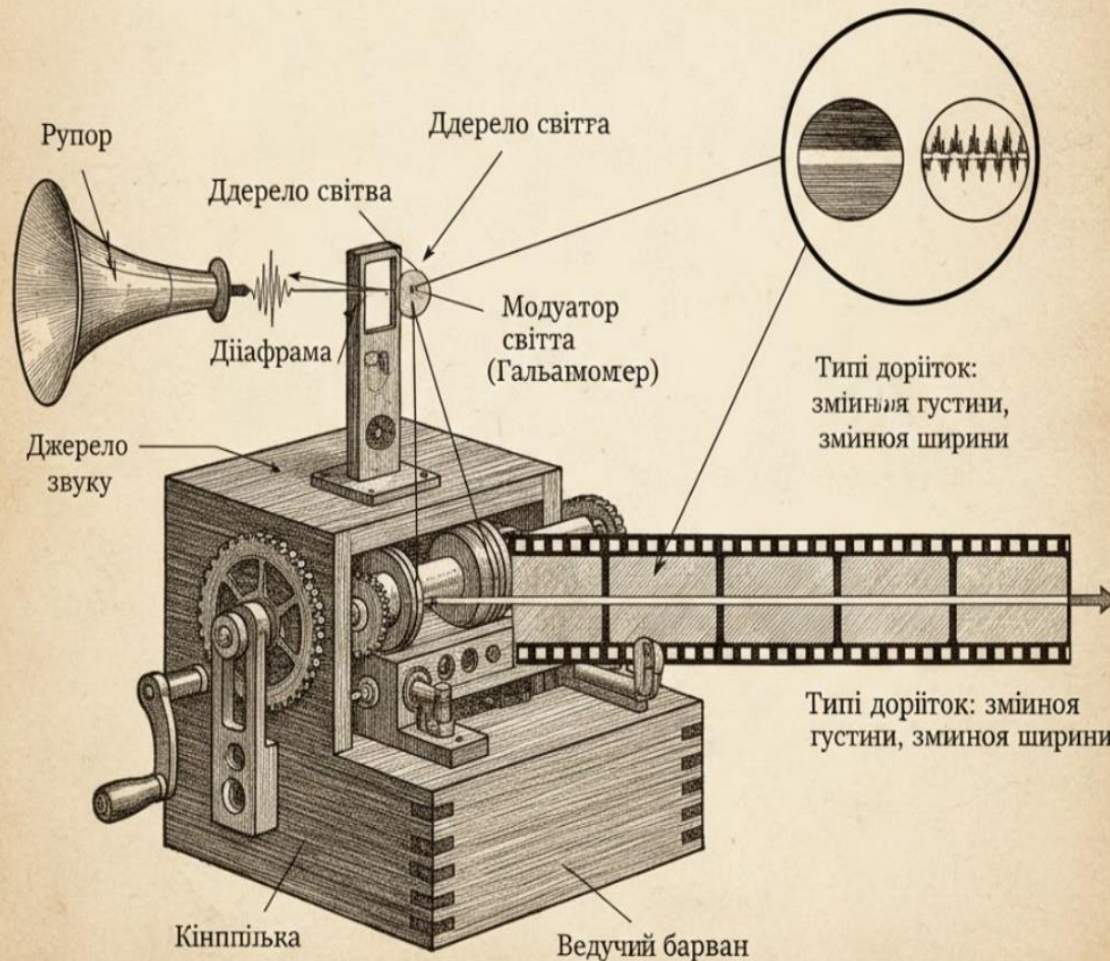
Метод Берлінера. Різець відхиляється горизонтально, створюючи звивисту лінію постійної глибини.

Формула $s(t) = k \cdot x(t)$ є математичним доказом того, що механічний запис є найпростішою формою збереження інформації, де носій стає «дзеркалом» звукової хвилі. Це створює базу для розуміння того, чому згодом виникла потреба в оцифруванні — для подолання обмежень коефіцієнта k , таких як тертя, інерція та зношування.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

2. Фотографічна система звукозапису.

Фотографічна система звукозапису (Кіно-Фонограф)



Фотографічна система звукозапису, стала наступним кроком після суто механічних методів **Едісона** та **Берлінера**. Ця технологія дозволила синхронізувати звук із рухомих зображенням, заклавши фундамент сучасного кінематографа.

На малюнку зображено процес перетворення акустичних коливань у візуальні образи на світлочутливій стрічці. Цей процес можна розділити на три ключові етапи:

1. Акустико-механічний блок – рупор, слугує для збору та концентрації звукових хвиль.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

2. Фотографічна система звукозапису.

Діафрагма. Тонка мембрана, яка вібрує під дією звукового тиску. На відміну від механічного запису, де діафрагма рухала різець, тут вона керує світловим модулятором.

2. Оптико-механічний блок (Модуляція).

-джерело світла - постійне джерело (лампа), що випромінює стабільний світловий потік.

-модулятор світла (Гальванометр). Центральний вузол системи. Він перетворює механічні коливання діафрагми або електричні сигнали на зміни світлового променя.

-механізм руху. Ведучий барабан забезпечує рівномірну протяжку кінострічки, що є критичним для запобігання детонації звуку (аналог джитера в цифрових мережах).

3. Носій інформації (Кінострічка). На малюнку окремо виділено типи оптичних звукових доріжок, що утворюються на плівці:

-змінна ширина (Variable Area). Звукова хвиля виглядає як «осцилограма» на краю плівки. Ширина прозорої ділянки змінюється відповідно до амплітуди сигналу.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

2. Фотографічна система звукозапису.

-змінна густина. Ширина доріжки залишається постійною, але змінюється ступінь її почорніння (прозорості), що відповідає інтенсивності звуку.

Математична модель:

$$\Phi(t) = \Phi_0 + \beta * x(t)$$

де: Φ_0 — базовий світловий потік спокою;
 β — коефіцієнт модуляції пристрою;
 $x(t)$ — вхідний звуковий сигнал.

Принцип роботи оптичного звукозапису:

Система працює за принципом послідовної трансформації енергії:

Звук → Рух → Світло → Плівка.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

2. Фотографічна система звукозапису.

1. Уловлювання звуку (Акустичний етап).

Усе починається з рупора, який збирає звукові хвилі та спрямовує їх на тонку мембрану (діафрагму). Коли людина говорить або грає музика, тиск повітря змушує мембрану тремтіти. Цей етап ідентичний механічному запису **Едісона**.

2. Керування світлом (Оптичний етап).

Це серце системи. Замість того, щоб голкою дряпати віск, мембрана з'єднана з маленьким дзеркальцем або шторкою (модулятором). На модулятор спрямовано постійний, рівний промінь світла від лампи. Коли мембрана вібрує, дзеркальце хитається, відбиваючи промінь, або шторка частково перекриває його. Таким чином, світло на виході стає «пульсуючим» — його інтенсивність або положення точно повторює коливання голосу.

3. Фіксація на носії (Етап запису).

Цей пульсуючий промінь потрапляє на край рухомої кіноплівки. Плівка в цьому місці вкрита світлочутливим шаром. Після хімічної обробки (проявлення) на краю плівки з'являється звукова доріжка. На вигляд це або звивиста біла лінія (як кардіограма), або смуга з різним ступенем прозорості.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

2. Фотографічна система звукозапису.

Як звук «повертається» назад? (Відтворення). Щоб ми почули цей запис у кінотеатрі, процес запускається у зворотному порядку:

1. Крізь готову звукову доріжку на плівці пропускають тонкий промінь світла.

2. Оскільки доріжка десь прозора, а десь чорна, світло на виході знову починає пульсувати.

3. Це світло потрапляє на фотоелемент — датчик, який перетворює світло на електричний струм.

4. Струм подається на підсилювач і динаміки, які знову перетворюють його на звук.

Чому це було проривом

1. Звук і зображення знаходяться на одному носії (плівці), тому вони ніколи не розходяться в часі.

2. При відтворенні доріжки торкається лише світло, а не голка. Плівка не зношується так швидко, як вініл.

3. Цей метод дозволив позбутися механічного «рипіння» голки, хоча додав власні шуми — «зернистість» плівки.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

3. Магнітна система звукозапису.

Магнітна система звукозапису



Представлена схема «Магнітна система звукозапису» ілюструє технологічний етап, який став революційним завдяки можливості багаторазового перезапису та високій якості сигналу.

Ця система базується на принципах електромагнетизму, що докорінно відрізняє її від механічних та оптичних методів.

Опис компонентів магнітної системи

Процес охоплює повний цикл перетворення енергії від акустичних хвиль до магнітних доменів і назад.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

3. Магнітна система звукозапису.

Вхідний блок (Запис).

-мікрофон. Перетворює звуковий тиск у слабкий електричний сигнал.

-підсилювач запису. Збільшує потужність сигналу до рівня, необхідного для роботи записуючої головки.

Блок магнітних головок.

-стираюча головка. Подає високочастотний сигнал, який хаотично орієнтує магнітні частинки, видаляючи попередній запис.

-записуюча головка. Електромагніт, який створює змінне магнітне поле, що змінює орієнтацію часток на стрічці відповідно до амплітуди звуку.

-відтворююча головка. Зчитує магнітне поле зі стрічки, перетворюючи його назад у слабкий електричний струм шляхом індукції.

Механізм протяжки.

-подавальна та приймальна котушки. Забезпечують рух магнітної стрічки з постійною швидкістю, що мінімізує спотворення частоти.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

3. Магнітна система звукозапису.

Вихідний блок (Відтворення).

-підсилювач відтворення. Готує слабкий сигнал із головки для подачі на динамік.

-динамік виконує фінальне перетворення електричних коливань у звукові хвилі.

математична модель

В основі роботи системи лежить закон електромагнітної індукції **Фарадея** та принцип намагнічування феромагнітних матеріалів (детально показано у правому верхньому куті малюнка). Магнітний потік Φ , що створюється записуючою головкою, прямо пропорційний струму запису $I(t)$.

$$\Phi(t) = L * I(t)$$

При відтворенні, електрорушійна сила індукції \mathcal{E} , що виникає у відтворюючій головці, пропорційна швидкості зміни магнітного потоку стрічки.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

3.Магнітна система звукозапису.

Φ - (Магнітний потік). Представляє собою інформаційний стан магнітної стрічки або диска в момент часу **t** . Саме цей потік фіксується у вигляді орієнтації магнітних доменів (диполів) робочого шару носія.

$I(t)$ (**Вхідний струм**). Електричний аналог звукового сигналу, що надходить від підсилювача запису на котушку магнітної головки.

L - (**Індуктивність / Коефіцієнт пропорційності**). Параметр записуючої головки, що визначає ефективність перетворення електричної енергії в магнітну. Цей коефіцієнт визначає «**чутливість**» каналу запису.

Дане рівняння демонструє принцип аналогового моделювання. Це означає, що кожна зміна амплітуди вхідного сигналу **$I(t)$** призводить до ідентичної зміни магнітного поля **$\Phi(t)$** .

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

3.Магнітна система звукозапису.

Формула:

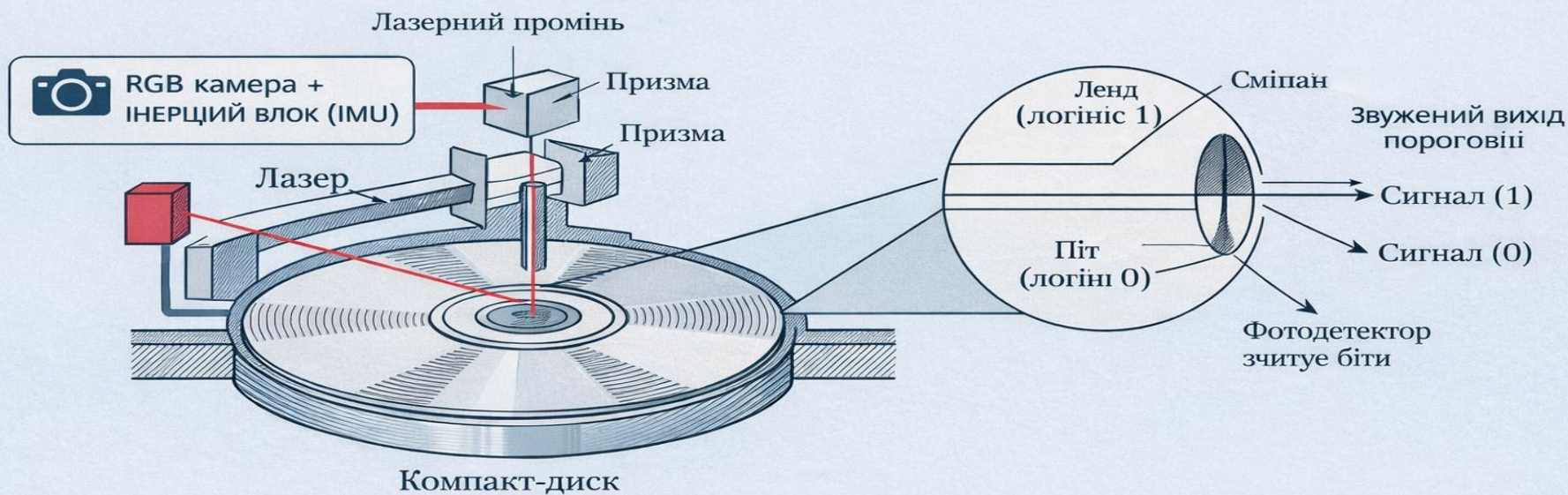
$$\Phi(t) = L * I(t)$$

є математичним містком між електронікою та магнетизмом. Вона показує, як інформація (звук) переходить у фізичний стан носія без втрати безперервності. Розуміння цієї формули є критичним для вивчення технологій зберігання даних, оскільки сучасні жорсткі диски (**HDD**) досі базуються на розвитку саме цього фізичного принципу, хоча й використовують цифрову модуляцію. Магнітна система запису вперше впровадила концепцію «багаторазовості» носія, що поставило питання цілісності та безпеки даних. Будь-яка фізична система (механічна, оптична чи магнітна) має певний поріг відмови, обумовлений зовнішніми завадами або деградацією матеріалу. Моніторинг мережевих показників (наприклад, затримки пакетів), який ми бачимо на прикладі тестування зв'язку, є сучасним аналогом боротьби з детонацією та нелінійністю в аналогових системах звукозапису.

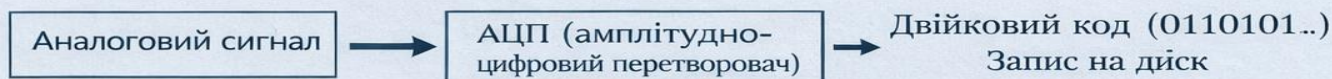
класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

4. Оптична система звукозапису. CD, DVD, Blu-ray. Позначає перехід від аналогової природи сигналів до цифрової дискретизації за допомогою лазерних технологій.

Оптична система звукозапису (Цифровий запис)



Цифрове перетворення



$$y_n = \text{quant}(x(t_{in}))$$

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

4. Оптична система звукозапису. CD, DVD, Blu-ray.

На малюнку зображено основні вузли оптичної головки, що взаємодіють із компакт-диском.

-**Джерело лазерного випромінювання.** Лазер генерує вузькопрямований когерентний промінь.

-**Система призм.** Виконує роль світлорозділювача, спрямовуючи відбитий від диска промінь на фотодетектор.

-**RGB камера + Інерційний блок (IMU).** Спеціалізований блок для високоточного позиціонування лазера та компенсації вібрацій під час обертання диска.

-**Компакт-диск.** Носій, на якому дані зберігаються у вигляді мікроскопічних ділянок із різною відбивною здатністю.

Профіль поверхні: **Піти та Ленди (Врізка).** Збільшений фрагмент поверхні диска пояснює фізику двійкового кодування:

-**Ленд (Land).** Рівна дзеркальна ділянка. Від неї промінь відбивається майже повністю, що інтерпретується як логічна «**1**».

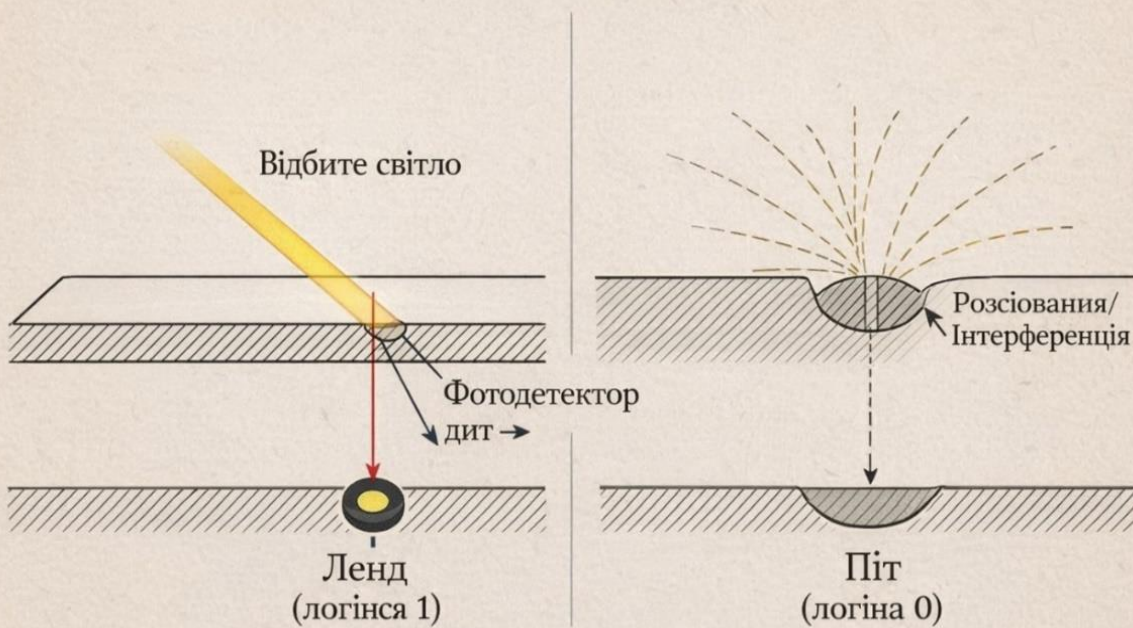
-**Піт (Pit).** Заглиблення (або темна пляма). Через фазове зміщення або розсіювання світла сигнал на фотодетекторі слабшає, що фіксується як логічний «**0**».

-**Фотодетектор:** Пристрій, що перетворює світлові імпульси у послідовність електричних бітів.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

4. Оптична система звукозапису. CD, DVD, Blu-ray.

Профіль поверхні: Піти та Ленди
(Фізика двійкового кодування)



Фізичні засади двійкового кодування. Піти та Ленди у сучасних оптичних системах (**CD, DVD, Blu-ray**) запис інформації базується на зміні фазових або амплітудних характеристик відбитого лазерного променя.

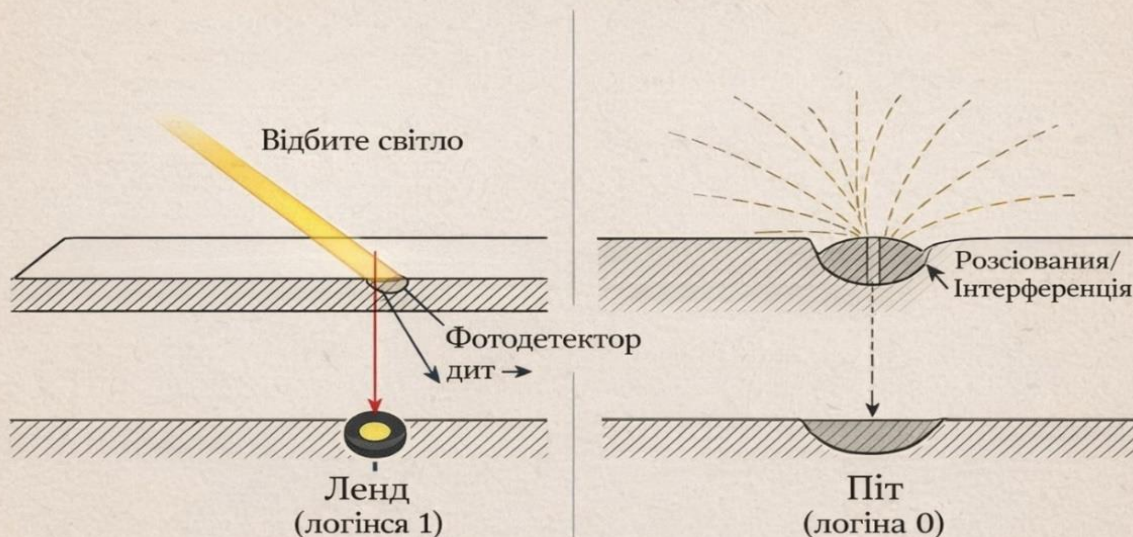
1.Ленд (Land) — Логічна «**1**». Це плоска дзеркальна ділянка поверхні диска.

Коли промінь потрапляє на **Ленд**, він відбивається майже повністю і повертається через систему лінз на фотодетектор. Фотодетектор фіксує високий рівень сигналу, що інтерпретується системою як **логічна**

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

4. Оптична система звукозапису. CD, DVD, Blu-ray.

Профіль поверхні: Піти та Ленди
(Фізика двійкового кодування)



2.Піт (Pit) — **Логічний «0»**. Це мікроскопічне заглиблення або спеціально сформована темна пляма на робочому шарі.

Глибина **Піта** зазвичай розраховується як $1/4$ довжини хвилі лазера $\lambda/4$. Це призводить до явища руйнівної інтерференції або розсіювання світла.

Промінь, що відбився від дна **Піта**, і промінь, що відбився від сусіднього **Ленда**, опиняються у протифазі та гасять один одного.

Фотодетектор фіксує відсутність або значне послаблення сигналу, що відповідає **логічному нулю**.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

4. Оптична система звукозапису. CD, DVD, Blu-ray.

Математична інтерпретація та АЦП

Перехід від аналогової природи звуку до такої дискретної структури описується через процес квантування:

$$y_n = \text{quant} * (x(t_n))$$

У цій моделі неперервний сигнал $x(t)$ вимірюється через рівні проміжки часу t_n . Кожне значення амплітуди перетворюється на найближче ціле число у двійковому форматі. Отриманий код (наприклад, **0110101...**) записується на диск як послідовність **Пітів** та **Лендів**.

Застосування **Пітів** та **Лендів** забезпечує надзвичайно високу завадостійкість запису. На відміну від механічного чи магнітного методів, де якість залежала від точності відтворення форми хвилі, у цифровій оптиці важливо лише зафіксувати наявність або відсутність відбитого світла. Це дозволяє використовувати потужні алгоритми корекції помилок, що робить цей метод стандартом для довготривалого зберігання мультимедійної інформації.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

4. Оптична система звукозапису - CD

СТАНДАРТ CD

Compact Disc Standard



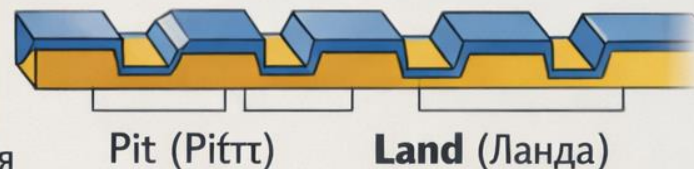
- Внутрішній діаметр: 120 мм
- Товщина: 1,2 мм
- Ємність: 700 МБ
- Час відтворення: до 80 хвилин

Зчитування диска

- Захисний шар
- Поликарбонатний шар
- Відбиваючий шар
- Дані (піти і ланду)



Структура даних



Код NRZ : **100110010111**

EFM-код : **100 00100001000111**

Довжина хвилі лазера: **780 нм**

Швидкість зчитування: **1,2–1,4 м/с**

Довжина піта: **0,83–3,5 мкм**

Трекова спіраль: **1,6 мкм** крок доріжки

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

4. Оптична система звукозапису - CD

На рисунку показано узагальнену схему "стандарту CD": геометрію диска, фізичний принцип зчитування (лазер + відбитий сигнал) і логіку кодування даних (**pit/land** → бітовий потік).

1). Геометрія та ємність CD (верхній лівий блок). Тут подані типові параметри CD (Compact Disc):

-діаметр диска - 120 мм. - (стандартний "повнорозмірний" - **CD**).

-товщина - ~1,2 мм. (полікарбонатна основа).

-ємність - часто пишуть "700 МБ" (для CD-ROM), а для аудіо — до ~80 хв. (CD-DA).

-важливо - "700 МБ" і "80 хв." — це поширені комерційні значення для дисків на базі стандарту, реальна корисна ємність залежить від формату (Audio CD, CD-ROM Mode 1/Mode 2 тощо).

2). "Структура даних". Pit і Land (верхній правий блок). Це ключова ідея – CD.

-Pit (піт) — мікрозаглиблення на інформаційному шарі.

-Land (ленд) — "плоска" ділянка між пітами.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

4. Оптична система звукозапису - CD

Лазер світить крізь прозорий полікарбонат на відбивний шар. Відбиття з pit та land відрізняється фазою/інтерференцією, тому на фотодіоді виходить різний рівень сигналу. Дуже важливий нюанс (і типова помилка спрощених схем).

У CD не кодують "0 = pit, 1 = land" напямую. Насправді інформація зчитується як переходи між pit ↔ land (тобто зміни), а не як "піт сам по собі" = біт.

3. "Зчитування диска" (нижній центральний/правий блок)

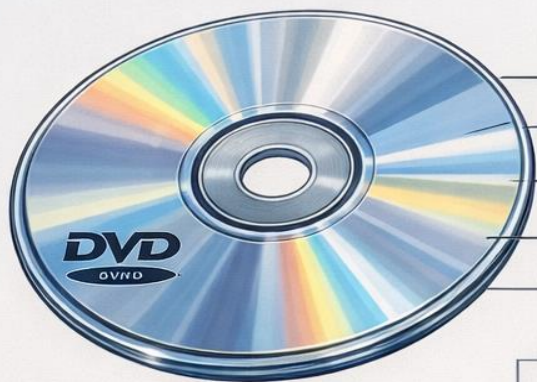
Лазерний промінь (на схемі) падає на диск. Фокусуюча лінза формує пляму малого розміру на доріжці. Відбитий сигнал повертається в оптичний тракт. Фотодіод перетворює зміни інтенсивності/фази у електричний сигнал. Далі електроніка виконує відновлення такту, декодування канального коду, корекцію помилок (у **CD** застосовується потужна корекція, зокрема **CIRC** для аудіо).

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

4. Оптична система звукозапису - DVD

СТАНДАРТ DVD

Digital Versatile Disc Standard



- Діаметр: **120 мм**
- Товщина: **1,2 мм**
- Ємність: **до 4,7 ГБ** (в один шар)
- Час відео: **до 135 хвилин** (в один шар)
- Швидкість запису (1x): **11 Мбіт/с**

Структура даних



Код NRZI: **100110010111**

EFM+ код: **00100000001000011111**

Одношаровий DVD



Одношаровий DVD



Зчитування диска

- Довжина хвилі лазера: **650 нм** (червоний лазер)
- Швидкість зчитування 1x: **3,49 м/с**
- Довжина піта: **0,4-0,44 мкм**
- Трекова спіраль: **0,74 мкм** крок доріжки

Двошаровий DVD



- Довжина хвилі лазера: **650 нм** (червоний лазер)
- Довжина піта: **0,4-0,44 мкм**
- Трекова спіраль: **0,74 мкм** крок доріжки

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

4. Оптична система звукозапису - DVD

На рисунку зображено узагальнену "інфографіку стандарту DVD".

1. Загальні параметри DVD (верхній лівий блок). Тут подані типові характеристики DVD (Digital Versatile Disc):

-діаметр: 120 мм — як у CD (зовні диски однакового форм-фактора).

-загальна товщина: $\sim 1,2$ мм. — але конструктивно DVD зазвичай складається з двох підкладок по $\sim 0,6$ мм, склеєних разом (це важливо для оптики та фокусування).

-ємність: до 4,7 ГБ (в один шар) — це типовий DVD-5 (одношаровий односторонній).

-час відео: до ~ 135 хв. (в один шар) — це умовне значення, бо залежить від бітрейту MPEG-2/аудіо/субтитрів.

-швидкість 1x: ~ 11 Мбіт/с — базова швидкість читання/передачі даних для DVD (порядку 1,385 МБ/с).

DVD має ту саму "геометрію" як CD, але значно більшу ємність завдяки меншій довжині хвилі лазера, вищій числовій апертурі, меншому кроку доріжки та коротшим "пітом".



класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

4. Оптична система звукозапису - DVD

2. Двошаровий DVD та перемикач шару (центральний блок).

Тут показано двошаровий DVD (типово DVD-9):

-1-й шар — відбивний (наприклад, алюміній).

-2-й шар — напівпрозорий (semi-reflective), щоб лазер міг або зчитувати верхній шар, або "пробивати" його й фокусуватись глибше.

На рисунку також показано відстань між шарами (порядку десятків мікрометрів це дуже мала відстань). Як відбувається перемикач шару. Оптична головка змінює фокус (і часто потужність/налаштування) так, щоб зчитувати Layer - 0 (ближчий), або Layer - 1 (дальший).

При переході між шарами у відео інколи помітна коротка пауза — це результат перефокусування та позиціонування.

3. «Зчитування диска» DVD (правий нижній блок). Червоний лазер ~**650** нм. — на відміну від CD (**780** нм). Коротша хвиля → менша пляма фокусування. Фокусуюча лінза — формує точну пляму на доріжці. Фотодіод — приймає відбитий сигнал і перетворює на **електричний**.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

4. Оптична система звукозапису - Blu-ray

СТАНДАРТ BLU-RAY

Blu-ray Disc Standard

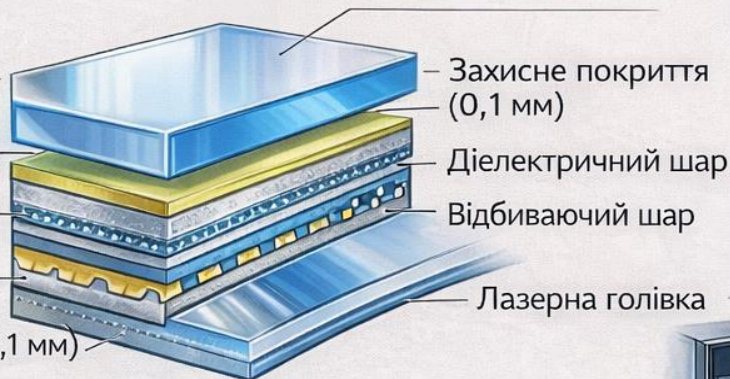


- Діаметр: **120 мм** (однаковий як у CD/DVD)
- Товщина: **1,2 мм** (але покриття товще)
- Ємність: **до 25 ГБ** (в один шар)
- Час відео: **до 5 годин** (в один шар)
- Швидкість запису (1x): **36 Мбіт/с**

Шари Blu-ray диска

Шари Blu-ray диска

- Захисне покриття (0,1 мм)
- Діелектричний шар
- Відбиваючий шар
- Полікарбонатний шар (~1,1 мм)



- Захисне покриття (0,1 мм)
- Діелектричний шар
- Відбиваючий шар
- Лазерна голівка

● Червоний: довжина хвилі ~**650 нм** (DVD)

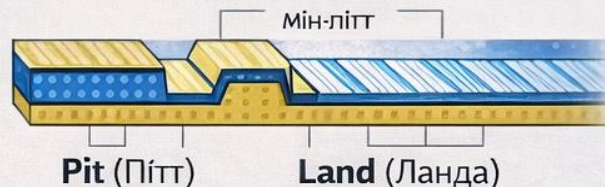
● Блакитно-фіолетовий лазер: довжина хвилі **405 нм**

● Довжина хвилі блакитного лазера: **405 нм**

● Швидкий: довжина хвилі ~**650 нм**

● Блакитно-фіолетовий лазер: довжина хвилі **405 нм** (Blu-ray)

Структура даних



Код PD: **100110010111**

MTR-код: **00010000001010000111**

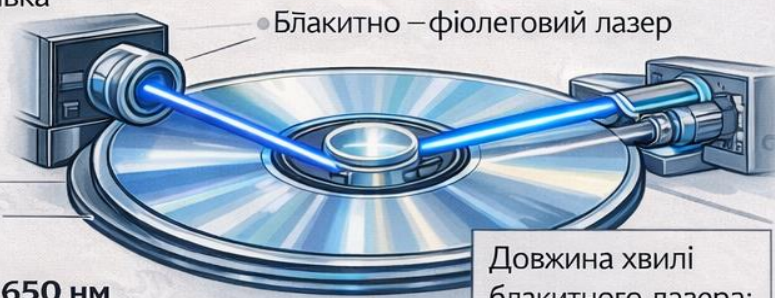
Зчитування диска

Довжина хвилі блакитного лазера: **405 нм**

Швидкість зчитування 1x: **4,92 м/с**

Довжина літа: **0,15 мкм**

Трекова спіраль: **0,32 мкм** крок доріжки



Довжина хвилі блакитного лазера: **405 нм**

ЄРез, ре.: молорестокий нодек

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

4. Оптична система звукозапису - Blu-ray

1. Загальні параметри Blu-ray (верхній лівий блок).

Тут наведено типові характеристики Blu-ray Disc (BD).

- діаметр: 120 мм — такий самий форм-фактор, як CD/DVD.
- товщина: 1,2 мм — загальна механічна товщина диска.
- ємність: до 25 ГБ (1 шар) — базовий одношаровий BD (BD-25).
- час відео: “до 5 годин” — умовна оцінка, реально залежить від кодека (H.264/VC-1/HEVC), бітрейту, аудіо та субтитрів.
- швидкість (1×): ~36 Мбіт/с — на інфографіках часто так подають порядкову “пропускну здатність”.

Для **BD** 1× орієнтовно $4,5 \text{ МБ/с} \approx 36 \text{ Мбіт/с}$ (це узгоджується з числом на рисунку). BD зберігає ті ж габарити, що **CD/DVD**, але різко збільшує ємність за рахунок коротшої довжини хвилі лазера та вищої щільності доріжки.

2) «Структура даних». Pit і Land + “мін-піт” (верхній правий блок). Показано фізичний мікрорельєф:

- Pit (піт) — мікрозаглиблення.
- Land (ленд) — проміжок між пітами.



класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

4. Оптична система звукозапису - Blu-ray

-позначка "мін-піт" натякає на дуже малу мінімальну довжину елемента запису (у BD вона значно менша, ніж у DVD і тим більше в CD).

Важливий принцип зчитування.

Як і в CD/DVD, інформація в оптичних дисках відновлюється не "піт=0, ленд=1", а переважно через переходи **pit** ↔ **land** і допустимі інтервали між переходами, які диктуються канальним кодуванням.

3. Шари Blu-ray диска (центральний блок).

Це ключова відмінність BD від DVD/CD у конструкції.

-захисне покриття ~0,1 мм. (на рисунку так і написано). У BD інформаційний шар розміщено ближче до поверхні, ніж у DVD/CD. Тому потрібне дуже тверде, стійке до подряпин покриття (часто згадують "hard coat").

-діелектричний шар — оптичні/технологічні проміжні шари.

-відбиваючий шар — металізований, формує відбитий сигнал.

-полікарбонатна основа (~1,1 мм) — механічна підкладка.

Чому так зроблено, коротка хвиля (**405** нм.) і висока точність фокусування "люблять" тонший оптичний шлях до інформаційного шару. Це допомагає зменшити аберації та підвищити щільність.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

5. Магнітооптична система звукозапису.

Рисунок ілюструє магнітооптичну систему звукозапису (magneto-optical). Запис виконується лазером + магнітним полем, а зчитування — лазером через магнітооптичний **Керровий** ефект. На схемі поєднано одразу три рівні: носій (шари диска), головка (лазер + електромагніт + оптика) і електронний тракт (бітовий потік/аудіо).

1. Шари магнітооптичного диска (лівий нижній блок). На схемі підписано три основні шари:

-захисний шар. механічний захист поверхні, зменшення подряпин, стабільність оптики.

-магнітооптичний шар (ключовий) тонка плівка з перпендикулярною магнітною анізотропією, де біт кодується напрямом намагніченості “вгору/вниз” відносно площини диска.

-відбивний шар забезпечує сильне відбиття лазерного променя для зчитування. Головна різниця з CD/DVD/BD - там дані — геометричні **pits/lands**, а тут дані — орієнтація магнітних доменів у тонкій плівці.

5. Магнітооптична система звукозапису.

2. Запис інформації - (центральна частина над диском).

Що відбувається під час запису (Write). Лазер локально нагріває магнітооптичний шар у точці фокусування (маленька "гаряча пляма"). При нагріванні коерцитивна сила матеріалу падає (йому легше "перемагнітитися"). Електромагніт задає напрям поля B (на схемі це стрілки - "**Магнітне поле (B)**"). Поки точка нагріта, домен перемикається відповідно до напрямку поля:

- поле "вгору" → умовно біт "1";
- поле "вниз" → умовно біт "0".

Коли зона охолола — домен "заморожується" в новому стані (стійке зберігання). Тобто запис — це термомагнітний процес. На схемі "управління бітовими даними" якраз і означає: бітовий потік керує струмом котушки (напрямок/полярність) у момент, коли лазер підігріває потрібне місце.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

5. Магнітооптична система звукозапису.

3. Зчитування - оптичне детектування намагніченості (промені й фотоприймач). На рисунку показано відбитий промінь і тракт зчитування. Фізично МО-зчитування базується на магнітооптичному **ефекті Керра**.

Поляризація відбитого світла трохи повертається (або змінює еліптичність) залежно від того, куди "дивиться" магнітний момент домену (вгору/вниз). Оптика з поляризатором/аналізатором перетворює цей мікроповорот у вимірювану різницю інтенсивності на фотодіоді. Фотодіод → електричний сигнал → порогова обробка → біти. На картинці різними кольорами позначено:

- промінь запису/нагріву (умовно "червоний/помаранчевий");
- промінь зчитування/відбитий сигнал (умовно "жовтий/синій").

У реальній апаратурі часто використовується один лазер (а не два), але для навчальної схеми розділення променів кольорами зручно, один "пояснює нагрів", інший — "пояснює детектування".

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

6. Запис на диски (цифровий запис). Має на увазі цифровий спосіб збереження звуку на носіях:

- HDD;
- SSD;
- флеш-пам'ять.

ЗАПИС НА ДИСКИ (ЦИФРОВИЙ ЗАПИС)

Digital Storage of Sound and Data

ЗАПИС НА HDD

1 1 0 0 1 0 1 0



Магнітні домени:

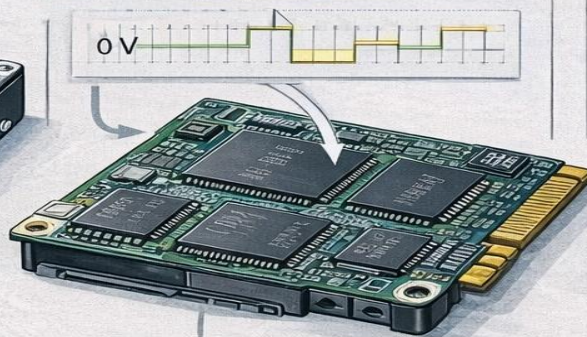
0 = S → N	1 = N → S
1 = N → S	1 = N → S

Магнітні домени:

0 = S → N	1 = N → S
-----------	-----------

ЗАПИС НА SSD

1 1 0 0 0 1 0 1 0



Електричний заряд осередків пам'яті:

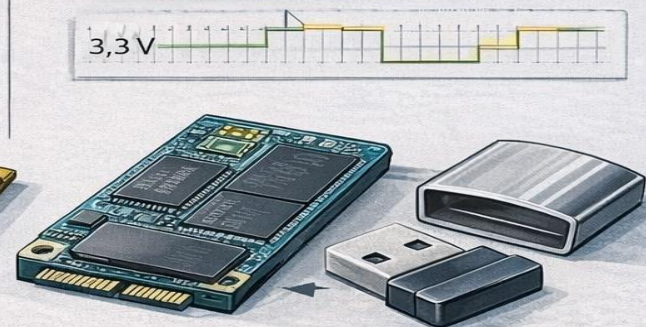
0 = розряджений заряд	
1 = один електронний шар	

Електричний заряд осередків пам'яті:

0 = розряджений заряд	
1 = два електронні шар	

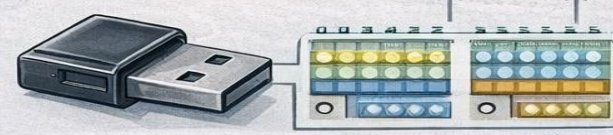
ЗАПИС НА ФЛЕШ-НАКОПИЧУВАЧ

1 1 0 0 0 1 0 0



Електричний заряд осередків пам'яті:

0 = розряджений заряд	
1 = накопичений заряд	



0 = розряджений заряд (один електронний шар)
1 = електронний шар

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

6. Запис на диски (цифровий запис).

Цей рисунок показує цифровий спосіб збереження звуку/даних на трьох типах носіїв: HDD, SSD і флеш-пам'ять. Будь-який звук спочатку перетворюється на цифрові біти 0/1, а далі ці біти фізично "кодуються" або магнітною орієнтацією, або електричним зарядом у комірках пам'яті.

1. Лівий блок: Запис на HDD - жорсткий диск.

Фізичний принцип **HDD** зберігає біти як напрям намагніченості доменів на поверхні пластини. У таблиці показано, що "0" і "1" відповідають різним напрямкам (умовно $S \rightarrow N$ або $N \rightarrow S$). Реалістичне уточнення, в сучасних **HDD** дані відновлюють не "станом домену", а дуже часто через переходи намагніченості (зміни полярності), які дають виразний сигнал у зчитувальній головці. Але для навчальної схеми "0 = один напрям, 1 = інший" — припустиме спрощення.

Як відбувається запис/читання

Запис - котушка в головці створює магнітне поле й "перемагнічує" ділянку доріжки.

Читання - сенсор головки реєструє зміни магнітного поля (у сучасних — магніторезистивні ефекти).

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

6. Запис на диски (цифровий запис).

2. Центральний блок. Запис на SSD (напівпровідниковий накопичувач).

Фізичний принцип. **SSD** зберігає дані в **NAND**-комірках через заряд у "floating gate" або "charge trap" транзистора.

1/0 (у схемі) показані як:

0 = розряджений транзистор (немає заряду);

1 = накопичений заряд / електрони.

Насправді (важлива деталь для точності), у **NAND** практична відповідність "**0/1** ↔ заряд" може бути інверсною залежно від реалізації та читання через пороги напруги. Але загальний принцип правильний, заряд змінює порогову напругу транзистора, і контролер за виміряним порогом вирішує, який біт (або які біти) там збережено.

класифікація систем звукозапису за фізичним принципом фіксації звукових коливань

6. Запис на диски (цифровий запис).

3. Правий блок. Запис на флеш-накопичувач (USB-флеш, карти пам'яті).

Флеш-накопичувач за природою та сама **NAND**-пам'ять, що й у **SSD**. Різниця переважно в:

- форм-факторі;
- класі контролера;
- кількості каналів паралельного доступу (**SSD** зазвичай значно швидший);
- ресурсі / прошивці.

На рисунку це показано як "той же заряд у комірках", тільки в компактному носії.