

УДК 004.085

Є. В. Беляк¹, Т. М. Кожан², А. А. Крючин¹

¹Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

²Інститут молекулярної і атомної фізики НАН Білорусії
проспект Ф. Скорини, 70, 220072 Мінськ, Республіка Білорусь

Методи побудови багатошарових голографічних носіїв інформації на основі фотолюмінісцентних матеріалів і середовищ з ефектом просвітлення

Проведено аналіз проблем об'ємного оптичного запису інформації. Запропоновано можливість об'єднання методів побудови багатошарових фотолюмінесцентних і багатошарових голографічних носіїв даних. Розглянуто кілька методик організації структури комбінованого носія та приводу зчитування, при розробці яких пріоритетними параметрами були щільність і швидкість запису та завантаження при відтворенні даних центрального процесора.

Ключові слова: оптичний запис інформації, багатошаровий оптичний диск, фотолюмінісцентне реєструвальне середовище, голографічний носій даних, середовище з ефектом просвітлення.

Вступ

Можливості оптичних систем реєстрації дозволяють досягти істотного збільшення ємності оптичних носіїв не тільки за рахунок зменшення діаметра лазерної плями, сфокусованої на поверхню носія, але й за рахунок запису інформації в об'ємі носія. На даний час розвиваються два технічних напрямки, що реалізують цю ідею, а саме: створення багатошарових носіїв інформації і голографічних об'ємних носіїв. Основною перевагою багатошарових носіїв є збереження форми представлення інформації, прийнятої на стандартних компакт-дисках (CD, DVD та BD) при істотному збільшенні загальної ємності носія (кількість шарів у носіях із люмінесцентним зчитуванням може складати порядку 100) [1, 2]. Тим не менш, необхідно відзначити проблему низької швидкості запису та зчитування інформації, а також низький рівень сигнал–шум (SNR), що є характерними для даного типу носіїв. З іншого боку, при голографічному методі реєстрації інформації [3, 4] за рахунок паралельного введення інформації з великого числа каналів і багатоканального зчитування, швидкості запису та зчитування інформації можуть бути на кілька по-

© Є. В. Беляк, Т. М. Кожан, А. А. Крючин

рядків вище, але в даному випадку основною проблемою є пошук ефективних і дешевих реєструвальних середовищ.

До матеріалу голографічного носія інформації існує ряд вимог, виконання яких є в тій чи іншій мірі важливим для реалізації відповідної концепції. Серед них зазвичай виділяють наступні: високу просторову роздільну здатність, а відповідно дрібнозернисту (із нанорозмірними зернами) структуру; високу фоточутливість (запис при опроміненні на рівні 10 мДж/см^2 і нижче); довгий термін зберігання носія після запису на нього інформації (десятьки років); довгий термін зберігання носія до запису на нього інформації (роки); можливість сухого запису; можливість запису за короткий проміжок часу (2 мкс і менше); можливість локального стирання інформації необмежене число раз; широку смугу запису в діапазоні видимого світла та нечутливість до зовнішнього випромінювання після запису. Огляд ряду робіт [3–8] по голографічному запису інформації дає підстави думати, що єдиним класом матеріалів, які задовольняли би даним вимогам є матеріали, що характеризуються ефектом електронного захоплення, в найбільшій мірі серед яких були дослідженні LiNbO_3 , леговані марганцем або залізом. Носій на основі даного реєструвального середовища утримує інформацію без додаткового ультрафіолетового підсвічування, і лише зчитування частково стирає записану інформацію, що неминуче при записі в середовищах із електронним захопленням. Однак технологічні складності по вирощуванню кристалів LiNbO_3 обумовлюють велику собівартість таких носіїв.

У зв'язку з цим було запропоновано об'єднати дві наведені вище концепції об'ємного оптичного запису з метою побудови універсальної структури носія, що характеризувався би високими показниками інформаційної ємності та швидкості зчитування та запису даних, але при цьому міг являти собою носій фабричного, одноразового чи багаторазового запису. Необхідно зауважити, що метод побудови конкретної моделі комбінованого оптичного носія може включати в себе лише окремі методики, характерні для голографічного запису, зокрема, таку як виділення окремого інформаційного шару завдяки застосуванню середовищ з ефектом просвітлення, а інформаційна структура при цьому складатиметься зі звичайних фотолюмінесцентних пітів і лендів.

Голографічний багат шаровий запис інформації у середовищах з ефектом просвітлення

Створення голографічних носіїв великої інформаційної ємності з можливістю локального запису та стирання даних зумовлює необхідність впровадження методики багат шарового запису. Для здійснення пошарового зчитування необхідно знайти спосіб виділення вкладу шару зчитування у відбиту хвилю, що детектується. Найбільш оптимальним є метод виділення шару за рахунок створення значної неоднорідності діелектричної проникності ϵ . Це забезпечує різницю внесків різних шарів середовища в модуляцію світла по амплітуді при амплітудному зчитуванні та по фазі при фазовому зчитуванні. Дослідження показали можливість виділення шару зчитування голографічного носія за допомогою маркувальної хвилі, інформація при цьому має бути записана у вигляді слабкої модуляції показника заломлення або коефіцієнта поглинання середи. В якості біжучої хвилі можна за-

пропонувати ультразвукові імпульси в акустооптичних матеріалах, солітони в напівпровідникових матеріалах, розподілення діелектричної проникності ϵ , що формуються за допомогою світлового потоку у фоторефрактивних і фотохромних матеріалах. В якості стаціонарної хвилі пропонується використовувати доменні границі в магнітних і сегнетоелектричних матеріалах, неоднорідності діелектричної проникності ϵ , що формуються за допомогою світла, електронного променя чи неоднорідного нагріву. Голограми можуть бути як двовимірні (чи лінійні), так і об'ємні; головна вимога для матеріалу інформаційного шару голографічного носія — ідентичність до матеріалу проміжного шару.

Недоліком розглянутої схеми є суттєва технологічна складність її конструкції, що зумовлена необхідністю формування в процесі зчитування маркувальної хвилі. Альтернативним методом, при якому маркувальною хвилею є сам промінь, що зчитує, може бути створення голографічного носія на основі матеріалу з ефектом просвітлення. Це дає можливість спростити схему та використовувати в якості джерела світлової хвилі такий простий і дешевий елемент як світлодіод.

Розглянемо процес зчитування інформації з голографічного носія, створеного на основі матеріалу з ефектом просвітлення. При опроміненні носія некогерентним світлом відбувається дифракція світла на записаних мікроголограмах, при цьому внесок інформаційного елемента в інтенсивність дифрагованого світла є прямо пропорційним інтенсивності світового поля в даному елементі. Під дією світла, що зчитує, відбувається просвітлення середовища, що первісно знаходилося в непросвітленій формі. Середовище опроміненого носія за глибиною можна поділити на три області. Це область повного просвітлення, внесок якої в інтенсивність дифрагованого світла є максимальним, непросвітлена область та перехідна область, в якій інтенсивність світла, що зчитує, експотенційно затухає, причому коефіцієнт затухання залежить від довжини хвилі. Щоб виділити внесок перехідної області треба за допомогою оптичних фільтрів вирізати зі спектра дифрагованої хвилі два різних фрагменти та співставити їхню різницю так, щоб компенсувати внесок повністю просвітленої зони. Таким чином, сигнал буде зчитуватись у перехідній області, глибиною якої можна варіювати, змінюючи інтенсивність світлової хвилі, що зчитує, або сформувавши для середовища умови біжучої хвилі просвітлення.

Розглянемо середовище у вигляді плоского нескінченного шару $0 \leq x \leq L$, на який падає плоска некогерентна світлова хвиля. Рівняння для затухання її спектральних компонент, як для хвилі, що зчитує, так і для дифрагованої хвилі буде мати вигляд:

$$\frac{\partial I(\omega, t, x)}{\partial x} = -2 \operatorname{Im} k_x(\omega, t, x) I(\omega, t, x), \quad (1)$$

де $I(\omega, t, x)$ — спектральна густина інтенсивності; t — час; ω — кругова частота світла; k_x — x -компонента хвильового вектора хвилі в середовищі.

Під дією світла фоточутливі елементи середовища переходять із непросвітленого стану (0-форми) до засвітленого стану (1-форми). Якщо ступінь переходу

середовища в 1-форму позначити як C , то рівняння для діелектричної проникності матиме вигляд:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + C \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_0), \quad (2)$$

де ε_0 та ε_1 — діелектрична проникність 0- та 1-форм відповідно. При $[\text{Im } k_z] \ll [\text{Re } k_z]$ зв'язок між затуханням і мнимою частиною діелектричної проникності є лінійною функцією, аналогічний лінійний вираз для C можна записати як

$$\begin{cases} \text{Im } k_{xi}(\omega, t, x) = \alpha_i(\omega) + C(t, x)\beta_i(\omega), \\ -\text{Im } k_{xs}(\omega, t, x) = \alpha_s(\omega) + C(t, x)\beta_s(\omega), \end{cases} \quad (3)$$

де α і $\alpha + \beta \in [\text{Im } k_x]$ для області без просвітлення та області з просвітленням, відповідно; індекс «s» відповідає дифрагованій хвилі, індекс «i» — падаючій хвилі. Слід зауважити, що $\alpha \geq 0$ і $\alpha + \beta \geq 0$, а для області повного просвітлення $\alpha + \beta = 0$. Для C може бути записано кінетичне рівняння:

$$\frac{\partial C(t, x)}{\partial t} = S_0(t, x) - C(t, x) \cdot \left(S_0(t, x) + S_1(t, x) + \frac{1}{\tau} \right), \quad (4)$$

де

$$\begin{cases} S_0(t, x) = \int_0^{\infty} \rho_0(\omega) I(\omega, t, x) d\omega, \\ S_1(t, x) = \int_0^{\infty} \rho_1(\omega) I(\omega, t, x) d\omega, \end{cases} \quad (5)$$

а ρ_0 і ρ_1 — коефіцієнти фоточутливості 0- та 1-форм, що залежать від довжини світла; τ — час темної релаксації. Типовою є ситуація, коли $\rho_1 = 0$, $\tau \rightarrow \infty$. Рівняння $\rho_1 = 0$ означає нечутливість 1-форми до зовнішнього світла, $\tau \rightarrow \infty$ відповідає стабільності 1-форми за умови відсутності світла.

Рівняння мають бути доповнені граничними умовами та початковою умовою. Якщо спектральна густина падаючої світлової хвилі не змінюється з часом, то гранична умова для хвилі, що зчитує матиме вигляд:

$$I_i(\omega, t, x = 0) = I_0(\omega). \quad (6)$$

Для хвилі, дифрагованої на шарі з координатою ξ , гранична умова може бути записана наступним чином:

$$I_{\xi}(\omega, t, x = \xi) = \gamma_{\xi} I_i(\omega, t, x = \xi), \quad (7)$$

де γ_{ξ} — коефіцієнт, що характеризує ефективність розсіяння. Нульова початкова умова $C(t = 0, x = 0)$ відповідає початковому моменту опромінення середовища хвилею, що зчитує.

Інтегруючи рівняння

$$I(t, x) = \int_0^{\infty} I(\omega, t, x) d\omega \quad (8)$$

для хвилі, що зчитує, та дифрагрованої хвилі з урахуванням граничних умов, отримуємо вираз:

$$I_{\xi}(\omega, t) = I_{\xi}(\omega, t, x = 0) = \gamma_{\xi} I_0(\omega) \exp \left\{ -2 \int_0^{\xi} [\alpha_i(\omega) + C(t, x)(\beta_i(\omega) + \beta_s(\omega))] dx \right\}. \quad (9)$$

Суттєвим є те, що для різних частот ω співвідношення внесків різних шарів можуть суттєво відрізнятися. Для того, щоб скористатися такою залежністю, потрібно за допомогою світлоподільвача отримати два екземпляри світлової хвилі та пропустити кожну хвилю через свій оптичний фільтр. Ці два фільтри відрізнятимуться характеристиками пропускання, зокрема, положенням максимумів пропускання. Ця процедура може бути описана переходом від спектральної густини інтенсивності $I_{\xi}(\omega, t)$ до двох інтенсивностей $I_{\xi}^{(1)}(t)$, $I_{\xi}^{(2)}(t)$, які визначаються рівняннями:

$$\begin{cases} I_{\xi}^{(1)}(t) = \int_0^{\infty} p_1(\omega) I_{\xi}(\omega, t) d\omega, \\ I_{\xi}^{(2)}(t) = \int_0^{\infty} p_2(\omega) I_{\xi}(\omega, t) d\omega, \end{cases} \quad (10)$$

де $p_1(\omega)$, $p_2(\omega)$ — функції пропускання фільтрів.

Інтенсивності (9), проінтегровані по ξ , можуть бути виміряні за допомогою фотоприймачів. Якщо враховувати залежність інтенсивності від поперечних координат, то для проведення вимірювання виявляється необхідною матриця фотодіодів. Виміряні значення будуть нести в собі внески всіх шарів області повного просвітлення та перехідної області. Для виділення внеску лише перехідної області різниця інтенсивностей має бути складена в такий спосіб, щоб нівелювати внески інших шарів. Більш точним було би розглядати лінійну комбінацію цих інтенсивностей (з протилежними знаками), однак легко побачити, що постійний коефіцієнт

ент завжди можна включити в $p_1(\omega)$ чи $p_2(\omega)$. У термінах внесків від окремих шарів отримуємо:

$$I_{\xi}^{(-)}(t) = I_{\xi}^{(1)}(t) - I_{\xi}^{(2)}(t). \quad (11)$$

З виразів (9)–(11) легко отримати наступне співвідношення:

$$I_{\xi}^{(-)}(t) = \int_0^{\infty} \Delta p(\omega) I_{\xi}(\omega, t) d\omega = \gamma_{\xi} \int_0^{\infty} \Delta p(\omega) I_0(\omega) \times \\ \times \exp\left\{-2 \int_0^{\infty} [\alpha_i(\omega) + \alpha_s(\omega) + C(t, x) \cdot (\beta_i(\omega) + \beta_s(\omega))] dx\right\} d\omega, \quad (12)$$

де $\Delta p(\omega) = p_1(\omega) - p_2(\omega)$. Варто зауважити, що на відміну від $p_1(\omega)$ та $p_2(\omega)$ функція $\Delta p(\omega)$ є знакозмінною. В тому випадку, коли різниця $(I_{\xi}^{(1)}(t) - I_{\xi}^{(2)}(t))$ дорівнює нулю і відповідно

$$\int_0^{\infty} \Delta p(\omega) I_0(\omega) d\omega = 0, \quad (13)$$

шари, до яких хвиля зчитування доходила без послаблення, не дають вкладу в різницю інтенсивностей. Шари непросвітленої області також не будуть давати внесок в інтенсивність, бо тут експоненційний множник (11) буде дорівнювати нулю.

Перехідна область є зоною зчитування інформації. Обрахуємо товщину цієї зони, що визначатиме кількість шарів у голографічному носії товщини L та швидкість біжучої хвилі просвітлення, що відповідатиме швидкості зчитування інформації з голографічного носія:

$$\frac{I(t, x)}{I_0} = C(t, x) = \frac{1}{1 + \exp\{-\rho_0 I_0 (t - t_0 - x/v)\}}, \quad (14)$$

де $v = \frac{\rho_0 I_0}{2\alpha_i}$ — швидкість біжучої хвилі; t_0 — константа, що залежить від початку відліку часу.

За допомогою чисельних методів з рівняння (13) можна отримати, що ширина шару, що зчитується, $L_L \approx 1/\alpha_c$. Це означає, що кількість інформаційних шарів обмежена величиною $\alpha_c L$. Час проходження шару товщиною $1/\alpha_c$ складає

$$T_1 = \frac{1}{v\alpha_i} = \frac{2}{\rho_0 I_0}. \quad (15)$$

Швидкодія схеми зчитування пропорційна інтенсивності хвилі, що зчитує I_0 .

Варто зауважити, що для зменшення складності конструкції пристрою, що зчитує, виділення потрібних компонент шару зчитування має бути зроблено за рахунок обчислювальних ресурсів комп'ютера. Таким чином, пропонується замінити оптичну схему зі світлоподільвачем і двома фільтрами комп'ютерною емуляцією процесу проходження світла через таку оптичну систему. Це дозволить зробити пристрій зчитування більш компактним і встановити контроль аналізу спектра, параметри якого будуть коригуватися користувачем.

Голографічний багатошаровий фотолюмінесцентний запис інформації

Поєднання голографічного запису в середовищах з ефектом просвітлення із багатошаровим фотолюмінесцентним записом дозволяє позбавитися від недоліків, характерних для обох типів об'ємної оптичної реєстрації інформації. Голографічний фотолюмінесцентний багатошаровий носій (FMH) може бути створений подібно до звичайного фотолюмінесцентного багатошарового диска (FMD) [1, 2]. Різниця полягатиме в структурі даних інформаційних шарів, інформація буде записана у вигляді люмінесцентних цифрових мікроголограм. Проміжні шари мають складатися з матеріалу з ефектом просвітлення, в загальному випадку його оптична щільність може відрізнятися від оптичної щільності інформаційних шарів через те, що в даному випадку корисний сигнал виділяється в більш надійний спосіб ніж для звичайного багатошарового носія. Пристрій зчитування має також відрізнятися від FMD-приводу. Промінь, що зчитує інформацію з шару FMH-диска, не має фокусуватися в пляму діаметром меншу за 1 мкм, як у випадку FMD-носія. На виході об'єктива FMH-приводу лазерний промінь формується в тонку смугу чи циліндричний світловий потік у залежності від того записана інформація у вигляді лінійних чи двовимірних голограм. При цьому немає необхідності у вертикальному переміщенні об'єктива з метою фокусування променя на потрібному шарі, що спрощує оптико-механічну схему пристрою зчитування. Пропонується записувати мікроголограми з площею в 200 мм^2 . При щільності запису $2 \cdot 10^4$ інформаційна ємність однієї мікроголограми складатиме 512 байт, зважаючи на інформаційну структуру сучасних файлових систем. Це оптимізує процес копіювання інформації з оптичного носія на жорсткий диск у тому, що стосується швидкості та надійності відтворення інформації. Швидкість запису при цьому може досягати величини 200 МБ/с.

Недоліком запропонованої схеми є низька швидкодія зчитування інформації та значне завантаження центрального процесора. Причинами цього є виділення спектральних компонент корисного сигналу та аналіз цифрових голограм, що потребує часу та призводить до значних втрат обчислювальних ресурсів операційної системи. Методом вирішення проблеми є запис інформації у вигляді блоків люмінесцентних пітів, які подібно до мікроголограм можуть бути одновимірними чи двовимірними. Це зменшить ємність окремого інформаційного шару FMH-диска через те, що блок пітів несе менший об'єм інформації, ніж мікроголограма відповідного розміру. Але за тієї умови, що в даному випадку кількість шарів, а відпо-

відно і загальна інформаційна ємність носія є необмеженою, зменшенням інформаційної ємності окремого шару цілком можна поступитися.

Для зменшення втрат швидкості зчитування інформації з FMN-диска та обчислювальних ресурсів операційної системи, зумовлених аналізом спектра та виділення спектральних компонентів корисного сигналу, може бути запропонована схема, що в значній мірі відрізняється від попередньої. У даному випадку інформація має записуватись у вигляді цифрових мікроголограм чи блоків люмінесцентних пітів шляхом знебарвлення люмінесцентного матеріалу інформаційних шарів. Опромінення носія при зчитуванні інформації відбуватиметься на двох довжинах хвиль λ_1 та λ_2 . Люмінесцентний матеріал носія має бути підібраний таким, щоб до запису знебарвленням давати двофотонний люмінесцентний сигнал при опроміненні інформаційного шару обома джерелами світла, та однофотонний сигнал — при опроміненні на довжині хвилі λ_2 . Після процесу запису знебарвлені зони мають давати двофотонний люмінесцентний сигнал при опроміненні обома джерелами світла, і не давати люмінесцентного сигналу при опроміненні на довжині хвилі λ_2 . При опроміненні на довжині хвилі λ_1 матеріал взагалі не люмінесцує. Широкий вибір люмінесцентних барвників і варіювання значеннями довжин хвиль λ_1 та λ_2 дозволяє підібрати люмінесцентний матеріал з потрібними оптичними властивостями. Зчитування інформації відбувається в незасвіченій зоні світла з довжиною хвилі λ_2 (див. рисунок), яка є засвіченою для світла з довжиною хвилі λ_1 .

Розглянемо інтенсивність люмінесцентного сигналу, що йде від шару зчитування, шарами, які розташовані над шаром зчитування та шарами, які розташовані під шаром зчитування. Інтенсивність сигналу від шару зчитування буде змінюватись від 0 до I_1 (інтенсивності однофотонної люмінесценції люмінесцентного матеріалу, що опромінюється світлом із довжиною хвилі λ_1). Нульова інтенсивність люмінесцентного сигналу відповідатиме знебарвленим у процесі запису зонам інформаційного шару, що не люмінесцують під опроміненням на одній довжині λ_2 .

Шари, які розташовані над шаром зчитування, внаслідок двофотонного поглинання даватимуть люмінесцентний сигнал, що значно перевищує сигнал I_1 . Але через те, що при двофотонному поглинанні люмінесцують і знебарвленні зони інформаційного шару, такий паразитний сигнал буде легко виділити.

І нарешті шари, що розташовані під шаром зчитування, будуть опромінюватися лише світлом із довжиною хвилі λ_1 і не даватимуть люмінесцентного сигналу взагалі.

Висновки

1. Головними перевагами голографічного запису є висока швидкість відновлення записаної інформації, що пов'язана з паралельним процесом зчитування, надійність збереження інформації та технологічна легкість позиціонування головки зчитування. З іншого боку, головною проблемою голографічного запису є нестача дешевих реверсивних реєструвальних середовищ.

2. Найбільш простим методом побудови багат шарового голографічного носія, який характеризується надзвичайно високою інформаційною ємністю, з технологічної точки зору, є метод, що базується на використанні середовищ з ефектом просвітлення.

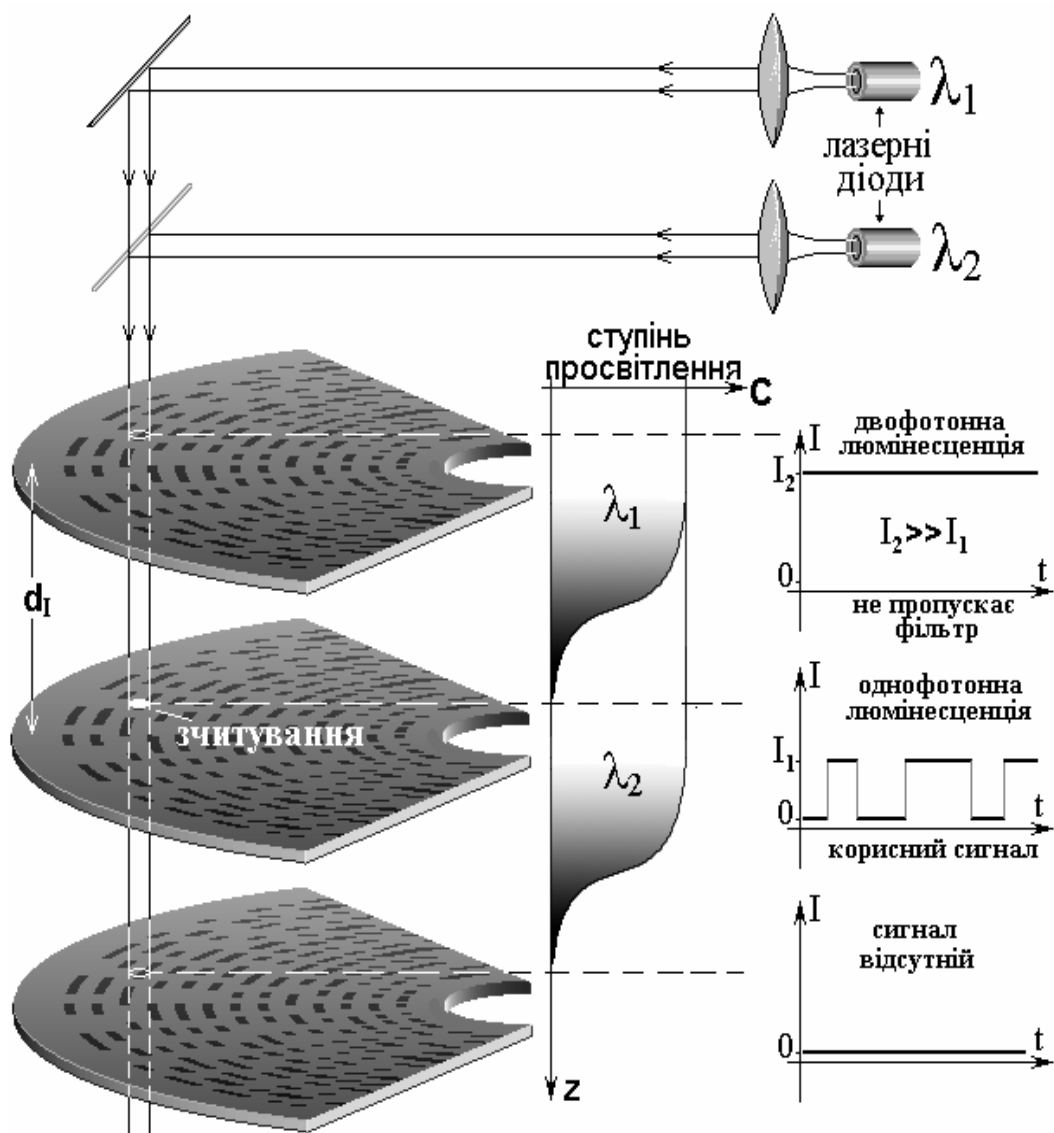


Схема просвітлення області шару зчитування на довжинах
хвиль λ_1 та λ_2 у запропонованій структурі FMH-носія

3. Запропоновано методики поєднання багатошарового фотолюмінесцентного та голографічного запису. Проведено аналіз схем реалізації комбінованого приводу зчитування цифрової інформації, що характеризуються технологічною простотою, високою інформаційною ємністю та високою швидкістю зчитування даних.

1. *Беляк С.В.* Методи багатошарового фотолюмінесцентного запису інформації / Беляк С.В., Кравець В.Г., Крючин А.А. // *Реєстрація, зберігання і оброб. даних.* — 2007. — Т. 9, № 4. — С. 3–18.

2. Пат. 6071671 США, МКИ G11B 007/24; G11B 007/22; G11B 007/00 Fluorescent Optical Memory // Glushko; Boris Alexey (Ashdod, IL); Levich; Eugene Boris (Bamat Aviv, IL); OMD Devices LLC (Wilimington, DE) Appl. — № 944402; Заявл. 06.10.97; Опубл. 06.06.02; НКИ 430/270.11, 270.15, 139, 321, 945, 369/275.3, 284, 288, 428/64. — 427 с.
3. Беляк Е.В. Оптическая запись информации на голографических носителях / Беляк Е.В., Крючин А.А., Стецун А.И. // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2004. — Т. 5, № 1. — С. 5–19.
4. Christophe Moser. Localized Holographic Recording in Doubly Doped Lithium Niobate / Benjamin Schupp and Demetri Psaltis // Optics Letters. — 2000. — Vol. 25, N 3. — P. 162–164.
5. Пат. 6,621,633 США. МКИ G02B 027/00 System and Method for Increasing the Diffraction efficiency of holograms / Barbastathis; George (Boston, MA); Sinha; Arnab (Cambridge, MA), Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, MA). — № 938249; Заявл. 23.08.2001; Опубл. 16.09.2003; НКИ 359/577.
6. Eichler H.J. Wavelength Multiplexing for the Microholographic Storage Disc / H.J. Eichler, P. Kuemmel, S. Orlic, B. Schupp, A. Wappelt // SPIE 1998. — Vol. 3401. — P. 177–184.
7. Tevetov E.R. Design of Holographic Memory System with High Data Storage Capacity / E.R. Tevetov, G.A. Matevosov // SPIE. — 1994. — Vol. 2429. — P. 179–186.
8. Marc Hachman. Aprilis Unveils Holographic Disc Media // Extreme Tech. — 2003. — № 2. — P. 1–6.

Надійшла до редакції 01.12.2008