

**Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича**

**ОСНОВИ РЕПРОГРАФІЇ
Конспект лекцій**

**Чернівці
ЧНУ
2022**

Основи репрографії: Конспект лекцій, 2022. –124 с.

У конспекті лекцій розглянуто основні методи репродукційного відтворення зображень, технологічні процеси, матеріали та обладнання для виготовлення копій, а також застосування кожного з наявних технологічних методів репрографії та перспективами їх розвитку.

Для студентів спеціальності видавничо-поліграфічна справа, аспірантів та наукових працівників у цих галузях.

Укладач: Максимяк Петро Петрович

НЕ 1.1 Предмет та основні завдання репрографії. Класифікація основних технологічних процесів репрографії.

1. Предмет та основні завдання репрографії.

1.1. Загальні відомості

Репрографія - галузь науки і техніки, яка охоплює сукупність способів, процесів та засобів відтворення зображень оригіналів з метою отримання копій без використання складальних друкарських форм та яка ґрунтується на застосуванні носіїв, що змінюють свої фізико-хімічні властивості під дією випромінювання.

Термін «репрографія» складається з трьох частин: «re» - «знову», «productio» - «виробництво або вироблення» та «grapho» - «пишу». Тобто, повторне виготовлення текстів, зображень, графічних матеріалів.

Цей термін уперше було введено в Нідерландах у першій половині 50-х років ХХ ст. і до 1960 р. він отримав міжнародне визнання. Термін прийнято на міжнародному конгресі з репрографії у 1963 році і закріплено у стандартах, в т.ч. діючих міждержавних стандартах, які регламентують у сфері репрографії вимоги до матеріалів, технічних засобів, методики випробувань тощо. Ми користуємося міждержавним стандартом ГОСТ 13.0.002-84.

Репрографічна техніка - група неполіграфічних засобів копіювання та розмноження документів.

Принциповими *відмінностями (особливостями)* засобів і технологій репрографії від поліграфічних способів одержання зображень є:

- Відсутність друкарських форм.

Згадані у даному визначенні друкарські форми це ті форми, що виготовляються окремо, поза друкарським процесом і часто є екологічно нечистими та шкідливими для здоров'я людини. У репрографічних друкувальних засобах друкарські форми можуть бути, але вони виготовляються автоматично в друкувальному засобі, без участі людини. Наприклад, трафаретні друкарські форми автоматично виготовляються на носіях, чутливих до лазерного випромінювання, в єдиному процесі друкування у ризографах. Репрографія забезпечує виготовлення відбитків зображень не тільки методами нанесення фарбної речовини на поверхню носія, але й зняттям шарів речовин з поверхні носія, змінами структури або хімічного складу носія.

- «Факсимільність» відтворення оригіналу («Факсимільність» відтворення оригіналу означає, що порядок розміщення елементів зображення, їх конфігурація, позначки, помилки

на письмі, нотатки тощо відтворюються на копії повністю, не залежно від збільшення або зменшення зображення).

- Зменшений технологічний цикл (виконуються за схемою «оригінал - копія»), при цьому копія може бути збільшена або зменшена порівняно з оригіналом, перенесена на паперовий носій, виготовлена на іншій основі. Тобто технологічний процес копіювання скорочується щонайменше на одну операцію (часто в кілька разів або багато разів).

- Отримані відбитки характеризуються «документальністю», яка пов'язана з «факсимільністю». У поліграфії ж порядок розміщення елементів, їх конфігурація, колір тощо відносно оригіналу можуть бути змінені.

- Малогабаритність та висока продуктивність обладнання.

Головне завдання репрографії полягає у максимально швидкому розмноженні документації незначними накладками (до 50 примірників).

Низька собівартість, мала трудомісткість, а головне, висока оперативність отримання одиночних копій та невеликих тиражів зумовили інтенсивний розвиток засобів репрографії. І хоча створюються нові засоби оперативної поліграфії, неоліграфічні процеси копіювання і тиражування з використанням репрографічних засобів дедалі більше витісняють їх.

Ці особливості забезпечують актуальність репрографії.

Діяльність сучасного підприємства неможливо уявити без використання засобів копіювання та оперативного тиражування документації. Дедалі більше підприємств і установ оснащують свої підрозділи сучасними та швидкодійними копіювальними апаратами, що працюють за принципами електрографії.

Не втратили актуальності і такі методи оперативного тиражування та архівування документації, як діазографія, фотографія, мікрофільмування тощо, тобто репрографічні методи копіювання.

Мікрофільм - найдавніший з нетрадиційних носіїв інформації. Ще в 1858 р. в одному з американських журналів була висловлена думка про збереження інформації шляхом мікрофільмування джерела. Нині бібліотеки мають можливість впровадження сучасної технології мікрофільмування. Існує відповідний ринок обладнання і мікроносіїв, який з кожним роком розвивається.

Мікрофільмування на сьогодні залишається найнадійнішим способом забезпечення довготривалого збереження інформації.

Перевага фотографії:

- більше сотні років зберігаються фотоплівки та фотовідбитки;
- радіація не впливає (магнітні носії, CD, DVD, Chip-Flash).

Водночас із "класичною" технологією мікрофільмування, в останні роки активно розвивається технологія "цифрового" мікрофільмування, з використанням СОМ-систем (Computer Output Microfilm). У технології цифрового мікрофільмування, замість паперового оригіналу, використовується його електронний образ, який можна отримати за допомогою спеціального скануючого пристрою - книжкового сканера.

Відсутність друкарських форм - основна відмінність репрографії від оперативної поліграфії.

Проте між ними є і чимало спільного. Багато процесів, використовуваних у репрографії, застосовують і в оперативній поліграфії. Так, наприклад, утворене на селеновій пластині електрофотографічне зображення можна перенести на папір (репрографія) або на підготовлену відповідним чином підкладку й отримати офсетну друкарську форму (оперативна поліграфія).

Узагальнена класифікацію репрографічних способів

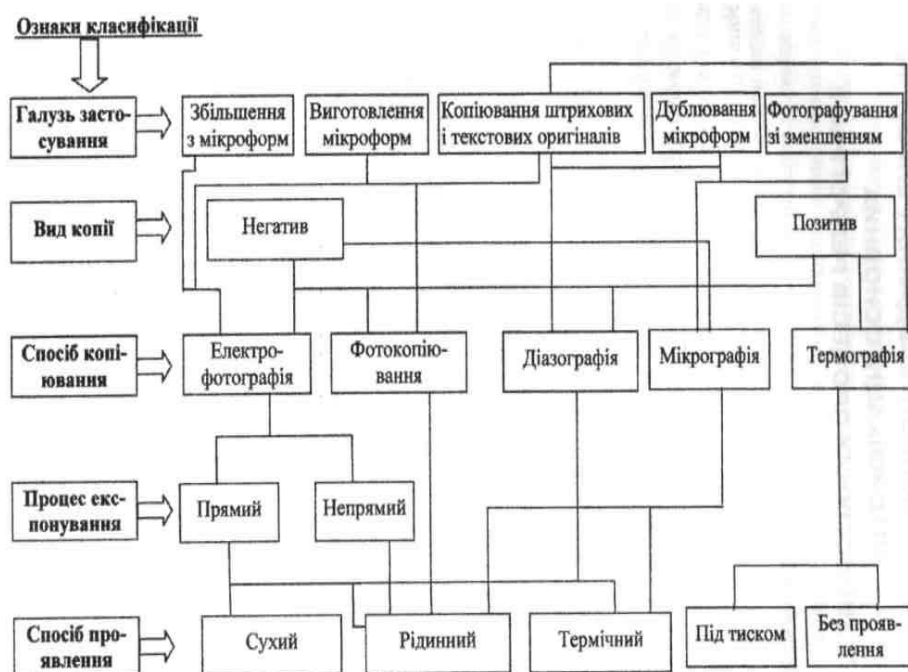


Рис. 1.1. Узагальнена класифікація основних способів репрографії

Значна частина унікальних документів виняткової історичної, наукової та художньої цінності, які зафіксували розвиток суспільства протягом багатьох століть, мають бути забезпечені цілісністю та незмінністю їхнього фізичного стану. В умовах підвищеного ризику природних катастроф, появи деструктивних явищ у суспільстві, зростання

екологічної небезпеки виникає загроза фізичної втрати документальних фондів. Забезпечення їхнього збереження є необхідною умовою і пріоритетним напрямом діяльності, що пов'язана з розробленням і впровадженням нових методів консервації, реставрації та їхнього збереження, зокрема, шляхом широкого використання репрографії.

Можна виокремити такі *основні сфери застосування репрографії*:

- 1) репродукування наукової інформації для бібліотек, наукових установ та окремих громадян;
- 2) для захисту оригіналів і створення страхових фондів шляхом мікрофільмування. Мікрофільмуванню підлягають такі документи:
 - пам'ятки писемності, що мають виключну історичну і культурну цінність;
 - найцінніші дореволюційні видання; видання 1917—1945 рр.;
 - окремі колекції XIX—XX ст., що складаються з прижиттєвих видань з автографами класиків науки і культури, книг з ілюстраціями видатних художників, виданих у невеликій кількості примірників;
 - єдині примірники вітчизняних видань, що мають наукову, історичну, художню чи інформаційну цінність;
 - видання, що користуються підвищеним попитом;
 - видання, яким загрожує руйнування через незадовільний стан паперу.
- 3) тиражування службової інформації;
- 4) оперативне тиражування документів для подальшої їх архівації (збереження документів або їхніх факсимільних копій протягом тривалого часу);
- 5) передавання інформації між організаціями за допомогою телефаксимільного зв'язку. Репрографічні засоби дозволяють не тільки отримувати та передавати інформацію, але й узгоджувати її без використання паперових носіїв.

Основні вимоги до оперативного тиражування документів способами репрографії:

- 1) швидкість процесу виготовлення копії та оперативність тиражування документації (потрібна кількість копій має бути отримана якомога швидше з найменшими витратами);
- 2) простота та надійність процесу передавання та оброблення інформації, оскільки операції копіювання документації зазвичай виконують працівники без спеціальної кваліфікації і тому обладнання та процес в цілому мають бути простими;
- 3) низька вартість процесу копіювання.

Цю вимогу можна виконати, забезпечивши оптимальне використання обладнання. Так, кожне обладнання має чітко визначену сферу використання, відповідні технічні характеристики (конкретну кількість копій за хвилину) та встановлений ресурс роботи (загальну кількість копій за період експлуатації). Тому використання офісного копіювального обладнання для тиражування великих накладів може призвести до швидкого виходу з ладу техніки, збільшення витрат на його обслуговування та ремонт, а отже, до підвищення вартості однієї копії та зниження її якості. Натомість використання професійного копіювального обладнання для тиражування декількох аркушів за день призведе до невиправданих витрат та порівняно великої вартості однієї копії. Тому, вибираючи ту чи іншу копіювальну техніку, потрібно визначити її середнє завантаження протягом устанавленого терміну, основні формати, що підлягають копіюванню, додаткові функції, а також максимальний термін експлуатації обладнання.

Вимоги до копії, отриманої методами репрографії:

- 1) на копії мають бути повністю і точно відтворені всі елементи зображення оригіналу;
- 2) копія не повинна містити елементів, яких немає на оригіналі;
- 3) копія має бути чіткою;
- 4) зображення на копіях повинні мати високу стабільність, бути достатньо стійкими до дії світла, вологи і тепла.

Вимоги до копій, призначених для довготермінового архівного зберігання:

- 1) копії документів, що зберігаються в архівах, мають не змінювати своїх властивостей впродовж часу їх зберігання;
- 2) копії мають бути легкими, компактними і водночас містити значний обсяг інформації;
- 3) архівні копії мініатюрного розміру мають бути придатними для отримання з них вторинних копій у реальному розмірі (у розмірі оригіналу) для подальшої роботи з ними;
- 4) копіювальний матеріал повинен мати досить високу роздільну здатність, дуже малу гранулярність (бути майже беззернистим), малу фотографічну широту, проте має бути контрастним і забезпечувати отримання високих оптичних густин зображення;
- 5) підкладка копіювального шару повинна мати достатню оптичну прозорість і високу стабільність, тобто не жовтіти з часом чи ставати непрозорою, жолобитись тощо.

1.3. Основні процеси репрографії

Основні способи отримання копій умовно поділяють на фотографічні, фотоелектричні та термографічні. Перелік основних матеріалів, що застосовують у репрографії, наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Перелік основних матеріалів, що застосовують у репрографії

Найменування копіювальних матеріалів	Характер виконуваних репрографічних робіт
Галогеносрібні фототехнічні	Копіювання штрихових та півтонових оригіналів
Галогеносрібні високороздільні	Копіювання мікрофільмів
Галогеносрібні та дифузійно-переносного оброблення	Копіювання штрихових та півтонових оригіналів
Діазотипні	Контактне копіювання штрихових та растрових оригіналів; дублювання мікрофільмів
Везикулярні	Контактне копіювання штрихових та растрових оригіналів; мікрофільмування; дублювання мікрофільмів
Фотохромні	Дублювання мікрофільмів
Фотополімеризаційні	Контактне копіювання будь-яких оригіналів натурального та заданого розмірів
Електрофотографічні	Проекційне копіювання штрихових та растрових оригіналів
Фотокондуктографічні	Проекційне копіювання штрихових та растрових оригіналів
Фототермопластичні	Проекційне копіювання штрихових та растрових оригіналів з великим зменшенням
Адгерографічні	Контактне копіювання штрихових та растрових оригіналів
Термографічні	Проекційне копіювання штрихових та растрових оригіналів
Електротермографічні	Проекційне копіювання штрихових та растрових оригіналів

Фотографічні способи ґрунтуються на фотохімічних процесах, що відбуваються у світлочутливих матеріалах під дією променистої енергії. Так, у галогеносрібних матеріалах під дією променистої енергії (світла) утворюється приховане зображення, у діазотипних (УФ) та везикулярних (несрібні) - перебігає реакція фотолізу (розкладання діазосполук), у

фотохромних - під дією променистої енергії утворюється барвник, а у алогполімеризаційноздатних шарах відбувається процес фотохімічно ініційованої полімеризації. Адгезографія (метод отримання графічних документів з використанням фарбуючого порошку, який прилипає до елементів прихованого зображення).

Репрографію поділяють на декілька напрямів, які ґрунтуються на застосуванні матеріалів — носіїв інформації з певними, властивими їм, фізичними характеристиками, таблиця 1.2.

Таблиця 1.2

Напрями (способи) репрографії	Особливість напрямку (застосування носіїв для запису інформації)	Метод утворення зображення
Електрофотографія	Носії, в яких змінюються електричні властивості під дією світлових випромінювань	Нанесення зображення
Електрографія	Носії з високим електричним опором, здатні утримувати електричні заряди, які локально нанесені на їхню поверхню	Нанесення електродом
Фотокопіювання	Галогенідосрібні та несрібловмісні носії, чутливі до світла	Зміна хімічного складу
Діазографія	Носії, чутливі до ультрафіолетового випромінювання	Зміна хімічного складу
Термографія	Носії, які змінюють свої властивості під дією теплового випромінювання	Нанесення. Зняття шару. Зміна хімічного складу
Магнітографія	Носії, чутливі до магнітних полів	Нанесення
Електрохімія	Носії, чутливі до електрохімічних процесів	Зміна хімічного складу
Електроерозія	Носії, чутливі до електричного струму	Зняття шару
Ризографія	Носії, чутливі долазерного випромінювання	Нанесення
Струминні способи	Створення різними методами потоків крапель фарб	Нанесення
Мікрографія	Виготовлення та застосування мікрозображень (мікроформ) — копій оригіналів	Зміна хімічного складу

Фотоелектричні способи використовують електрофотографічні процеси на фотопровідних шарах. Більшість електрофотографічних процесів репрографії ґрунтується на явищі фотопровідності напівпровідників. Цими способами передбачається також використання явища стійкої провідності, внутрішньої поляризації та інших явищ.

Термографічні способи ґрунтуються на використанні термочутливих матеріалів, у яких під дією теплової енергії перебігають хімічні реакції (термофакс) або змінюється фізичний стан шару (адгерографія, електро-термографія тощо), що також зумовлює появу зображення.

1.2. Сучасний стан та тенденції розвитку репрографії

Технологія репрографічних процесів включає:

- різноманітні варіанти процесів виготовлення копій;
- збереження інформації;
- та оперативний доступ до документованої інформації.

Розвиток **цифрових технологій** дав можливість підвищити зручність і оперативність використання інформації, яка зберігається в документах, шляхом переведення її в **цифрову форму** для подальшого використання в обчислювальних системах і мережах. Це забезпечує можливість **віддаленого доступу, подальше опрацювання, істотно розширює коло користувачів.**

У репрографії широко використовуються принтери, які за технологією друку поділяються на **матричні, струменеві, лазерні та сублімаційні** (тв.тіло-газ), а за кольором на — **кольорові та монохромні**. Лідером є струменевий друк, другим - лазерний друк, третім - термо-сублімаційний, четвертим - матричний. На ринку з'явилися нові технології, наприклад, "гелеві" принтери. Такі принтери потребують відповідних тонерів. "Гелеві" пігментні тонери — новий крок у цифровому друці, в основі яких, порівняно зі звичайними пігментними тонерами, є рідкий реагент тонера з високою в'язкістю, і який при контакті з папером миттєво вбирається в нього.

Набули поширення **багатофункціональні пристрої**, в яких об'єднані **принтер, сканер, копір і факс**. Таке об'єднання раціональне і зручне в роботі.

Сучасні репрографічні методи та обладнання дають змогу легко, швидко та надійно вирішити проблеми створення, підтримки і модернізації цифрових та мікрографічних архівів, сканування паперових архівів, інтеграції мікрографічних архівів в систему документообігу.

Наприклад,

- **Книжкові сканери Omniscan 8000-3S** призначені для сканування брошурованих документів, значно покращують зберігання документів в архівах, завдяки дуже делікатному поводженню з оригіналами.
- **Широкоформатні сканери Omniscan 1000**, що використовуються для сканування і мікрофільмування карт, креслень та інших документів великого формату, забезпечують найвищу роздільну здатність, точну кольоропередачу навіть при компактних розмірах.
- **Поточні сканери Скамакс 5000М** здатні обробляти незброшуровані документи з дуже високою швидкістю - до 460 сторінок за хвилину.
- **Сканери мікроформ Scanpro 1000** дають можливість працювати з мікрофішами та рулонною мікроплівкою усіх розповсюджених форматів, до того ж в повністю автоматизованому режимі.
- **Мікрофільмуючі камери Omnia OK 300 Hybrid Color** призначені для перенесення на мікроформу всіх видів паперових документів (книг, газет, великоформатних документів: карт, креслень та постерів розміром до 1350x960 мм), оснащені мікропроцесорною системою керування, що дають змогу повністю автоматизувати процес мікрофільмування, максимально спрощують роботу оператора.

Особливо перспективними є **гібридні системи**, які поєднують в собі функції **сканування й мікрофільмування**, що дозволяє переведення паперових документів в електронну та мікрографічну форму одночасно. Таким чином, гібридні системи вирішують і проблеми **оперативного доступу**, і завдання **довгострокового зберігання інформації**. Названим вимогам найбільше відповідає технологія, що розроблена на основі використання електронно-мікрографічних процесів запису, довгострокового зберігання та оперативної видачі різних видів документів. Електронно мікрографічні технології опрацювання документації базуються на можливості якісного перетворення аналогової інформації з паперових документів та мікрофільмів у цифрову шляхом їхнього сканування, а також зворотного перетворення цифрової інформації з електронних носіїв в аналогову форму й комп'ютерного запису її на мікрофільми та паперові носії.

Алгоритм процесів електронно-мікрографічної технології довгострокового збереження документів, наведено на рис.

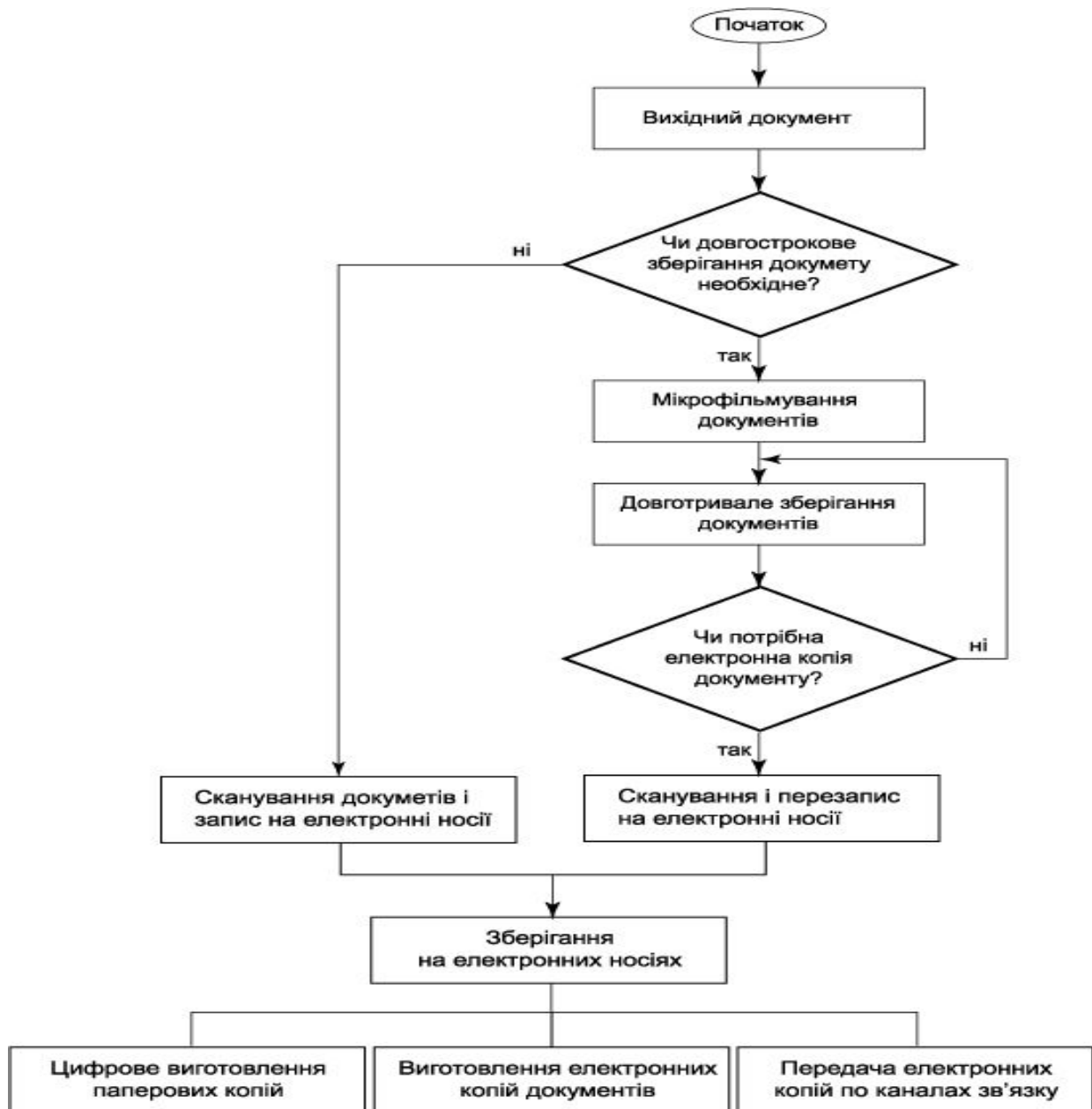


Рис.1.1 Алгоритм технологічного процесу електронно-мікрографічної технології довгострокового збереження документів та оперативного доступу до них.

Дуже значний вплив на сучасну репрографію мали ЦДТ. **Цифрові друкарські технології** народилися завдяки появі у свій час двох факторів.

Перший — це технології так званої «**оперативної поліграфії**», які наштотували технічну думку на пошуки принципово інших шляхів отримання друкованих відбитків (крім традиційного нанесення фарби на задруковуваний матеріал за допомогою проміжного матеріального носія інформації — друкарської форми).

Другий фактор — це нагальні потреби обчислювальної техніки отримувати результати її роботи у вигляді **твердих копій**, тобто відбитків на папері або інших носіях.

Перший фактор вреспті-решт сформував науково-технічний напрям — репрографію, а другий (разом з технологіями репрографії) — цифрові друкарські технології і технічні засоби виведення на друк інформації з комп'ютерів, а згодом і цифрові друкарські машини.

Репрографічна техніка складає групу нетрадиційних засобів копіювання та розмноження оригіналів (у т.ч. отриманих в результаті додрукарської підготовки видання). Технічні репрографічні засоби, в яких застосовуються цифрові методи обробки інформації, належать до комп'ютеризованої репрографічної техніки (наприклад, цифрові копірпринтери, дублікатори).

Системи, що складаються із технічних репрографічних засобів, засобів обчислювальної техніки, засобів запису і відтворення аудіо та відеоінформації належать до комп'ютеризованих репрографічних систем — репросистем.

До **комп'ютеризованих репросистем** належать також системи масової обробки документів (у тому числі строгої звітності) з додруком у них змінної інформації. Такими системами є автоматизовані паспортні системи; автоматизовані системи обробки документів у службах соціального захисту; автоматизовані системи в банках, архівах, бібліотеках, музеях, закладах освіти, медичних закладах, великих торговельних підприємствах, органах управління та контролю тощо [4].

Цікаву історію можна простежити у процесі розвитку друкарських засобів, призначеної для обчислювальної техніки (комп'ютерів). Перші цифрові обчислювальні машини виникли в 40-х роках ХХ ст., у яких для виведення інформації застосовували звичайні канцелярські друкарські машинки, дороблені для підключення до ЕОМ. Пізніше почали розробляти спеціалізовані друкарські засоби (принтери), призначені виключно для ЕОМ: з можливістю друкувати різними наборами знаків; широкими рядками; з великою швидкістю; якістю; пониженим акустичним шумом; малими габаритами; спрощеними вимогами до технічного обслуговування (завдяки підвищенню надійності та особливостей конструкцій) тощо. Конструкторська думка творців принтерів звичайно зверталася і до поліграфії, яка вже мала на той час декілька століть розвитку.

З поліграфії було взято багато ідей стосовно способів і технологій друку, а саме: високий друк; ротаційна схема друкування; схеми транспортування паперу в друкарських машинах; набір рядка з окремих знаків... Але не більше. І ось чому. Призначення формовмісних технологій поліграфії — є мультиплікація, тобто виготовлення багатьох однакових примірників. Тому друкарські форми мають повну сторінку (або полосу) того,

що потрібно надрукувати, і воно заздалегідь підготовлене. Тому й друкарські форми можна підготувати заздалегідь.

Принтери ж ЕОМ повинні друкувати разові сторінки того, що заздалегідь не може бути підготовлене; тобто результати роботи ЕОМ становлять невідому інформацію. Тому в принтерах немає друкарських форм, схожих на поліграфічні. У кожному мить в принтері потрібно за командами ЕОМ автоматично сформувати рядок знаків для друку. Спочатку для цього використовували шрифтоносії — механічні конструкції з незмінюваним (іноді змінюваним вручну) обмеженим набором знаків, у кілька десятків. Такі конструкції виготовлялися з металу і вони мали вигляд циліндрів (барабанів), дисків, стрижнів, гнучких стрічок, квітки ромашки і, навіть, сфер. На їх поверхні механічно накатувалися (іноді хімічно витравлювалися або виливалися, потім зміцнювалися різними покриттями) знаки шрифтоносія. Далі шрифтоносій устанавлювався в принтер, приводився у рух (наприклад, барабанний шрифтоносій обертався з швидкістю до 1200...1600 об./хв.).

Між поверхнею шрифтоносія та папером знаходилося тканне полотно (стрічка), просочене фарбою. По паперу наносилися удари (спеціальним ударним механізмом — молоточками) так, щоб вони влучали у певні знаки шрифтоносія. Процес автоматично керувався електронними блоками принтера. Так відбувалося друкування, а тому метод отримав назву «ударний». Такий метод застосовується і в сучасних принтерах (спеціального призначення і в т.з. «матричних»). Зрозуміло, що характеристики шрифтоносіїв за міцністю та зносостійкістю повинні суттєво відрізнятися від друкарських форм. Адже кожний знак на шрифтоносію повинен витримувати без помітних змін розмірів не менше 107...108 ударів із силою до 120 Н.

Барабанні шрифтоносії були дуже схожі на поліграфічні друкарські форми. Очевидно тому поліграфісти, у свій час, бралися за виготовлення шрифтоносіїв. Але експериментальні зразки таких шрифтоносіїв витримували сумарно не більше 105 ударів. А це означало, що кожні 10...20 днів роботи принтера необхідно замінювати шрифтоносій, що було зовсім неприйнятним (в т.ч. і за вимогами стандартів обчислювальної техніки).

Тому розробники принтерів весь час шукали інші методи і засоби друку. І знайшли їх у тих способах, які складають нині сучасну сферу репрографії.

Зараз у принтерах для ЕОМ використовують такі способи друку репрографії: електрофотографія (лазерні і світлодіодні принтери); електрографія (широкоформатні електростатичні принтери-плотери); термографія (сублімаційні, термовоскові принтери,

термопринтери з використанням термопаперів — паперів, просочених певними хімічними речовинами); струминні способи (рідинноструминні, твердоструминні принтери); електроерозія (електроерозійні принтери — принтери спеціального призначення для роботи у наджорстких кліматичних умовах). Ще раніше застосовувалися: магнітографія (магніто-графічні принтери); електрохімія (електрохімічні принтери-плотери).

Розвиток друкувальної техніки для ЕОМ (на основі репрографічних способів друку) природньо привів і до створення цифрових друкарських машин для поліграфії.

Так чітко прослідковується у поліграфії й обчислювальній техніці взаємозбагачення знаннями і технічними ідеями.

Нині у поліграфічному виробництві експлуатується парк (ще відносно невеликий) цифрових друкарських машин (ЦДМ). Наприклад, машини E-Print, DCP, Riso-Print... Ряд ЦДМ забезпечують високу якість друкування (не гірше офсетних друкарських машин), інші ще поступаються за якістю друкування (Riso-Print). Але всі ЦДМ мають багато корисних і цікавих функцій, які збагачують функціональні можливості поліграфії і є недоступними традиційним друкарським машинам. До того ж, і це головне, то, що всі ЦДМ виключають необхідність окремого виконання формних процесів, природньо стикуються з сучасними системами підготовки друкованих видань —автоматизованими системами переробки текстової і графічної інформації (АСПТГ), а деякі з них одночасно з друкуванням замахуються навіть і на виконання післядрукарських процесів [6—10].

Отже явно простежується ідея поєднання всіх поліграфічних процесів (а саме підготовку авторських або видавничих оригіналів до друку, друкування, виконання брошурувально-палітурних та опоряджувальних процесів) в одну безперервну лінію з максимальною комплексною автоматизацією виготовлення друкованої продукції. А це вимагає позбутися окремо виконуваних формовмісних процесів (а з ними, звісно, і всього, призначеного для них, шлейфу апаратів, машин, матеріалів, технологій) і впроваджувати репрографічні методи друкування. Здійснення цієї ідеї звичайно непроста справа. Щоб вкласти бодай маленьку частинку у зусилля до реалізації вказаної ідеї, давайте порівняємо функціональні можливості, особливості і недоліки сучасних ЦДМ з традиційними друкарськими машинами. Таке порівняння дасть можливість виділити перші найважливіші напрямки робіт заради побудови на основі досягнень репрографії і обчислювальної техніки принципово нової поліграфії — цифрової. Цифрова поліграфія має низку особливостей, які суттєво розширюють функціональні можливості виготовлення друкованих видань,

підвищує їх якість. Обличчя цифрової поліграфії формують особливості цифрових друкарських машин та комп'ютерних технологій. Тому і розглянемо їх.

По-перше, витрати часу на отримання готової друкованої продукції при застосуванні ЦДМ, як правило, суттєво менші, ніж за традиційної технології.

Далі, ЦДМ забезпечують реалізацію режиму «Друк на замовлення». Це означає, що друкується не просто певний, якимось чином орієнтовно визначений тираж, а друкується така кількість примірників видання, на яке існує на даний час замовлення. Ці замовлення можуть збиратися (в т.ч. електронною поштою, через Інтернет) за будь-який період — місяць, тиждень і навіть добу і тут же друкуватися.

ЦДМ забезпечують персоналізацію примірників тиражу: кожний друкований примірник може мати змінну частину (частини), пристосовану до особливостей конкретного замовника або його вимог.

ЦДМ можуть друкувати зображення, растровані будь-яким способом, в т.ч. стохастичним. Відомо, що стохастичне растрування принципово не породжує явища муару, що супроводжує будь-яке регулярне растрування, а отже і амплітудно-модульоване растрування, яке майже завжди застосовується у традиційних друкарських машинах, точніше в їх друкарських формах. Застосування стохастичного растрування пов'язано з вимогою до розміру растрової точки, яка повинна бути якомога менша, хоча б у межах 14...30 мкм. Такі растрові точки важко відтворити на друкарських формах: потрібно застосовувати підвищеної якості фотоплівки, формні пластини, хімічні матеріали, чітко витримувати технологічні правила та режими, мати добре відлагоджене устаткування. Стохастичне растрування, внаслідок відсутності явища муару, забезпечує:

— відтворення дуже широкого тонового діапазону з плавними переходами, адже відсутня відома залежність між лініатурою, кількістю тонових градацій і роздільною здатністю фотоскладального апарату;

— відтворення зображень Hi-Fi Color методами, тобто більшою кількістю фарб, ніж чотири фарби, як, наприклад, у методі СМУК (немає кутів повороту растрів — цього вимушеного прийому заради деякої компенсації муару при амплітудно-модульованому раструванні).

Отже стохастичне растрування принципово забезпечує суттєво вищу якість відтворення зображень. Є й інші переваги такого растрування, наприклад, відсутність муару при скануванні зображень, сканувати можна з меншою оптичною роздільною здатністю, зменшуються обсяги файлів зображень в АСПТІ. Для ЦДМ не потрібні растрові

процесори (РП). Їх функції виконуються робочою станцією АСПТГ, до якої безпосередньо (або через мережу, в т.ч. Інтернет) підключена ЦДМ, або яка записує файли підготовлених до друку видань на машинні носії (оптичні, магнітні, магнітооптичні носії, переносні пристрої flash пам'яті). Далі, отримання якісних кольорових зображень вимагає виконання попередніх перед друкуванням операцій кольоропроби. При традиційному друкуванні кольоропроба (аналогова) виконуються на спеціальному обладнанні, як правило не тими фарбами та не на тому папері, на якому буде друкуватися тираж. До того ж на виконання такої кольоропроби витрачається відносно багато часу, за який у друкарні може змінитися вологість і температура оточуючого середовища, що знецінює результати кольоропроби.

При друкуванні на ЦДМ кольоропроба (цифрова) може виконуватися на тій же машині, тими ж фарбами і на тому ж папері (чи інших матеріалах), на яких буде виготовлятися тираж. Причому можна одночасно отримати декілька кольоропробних відбитків, з різними, наперед заданими, співвідношеннями кольорів, яскравості, контрастності, а потім вибрати, або, при потребі, тут же скоригувати (на АСПТГ) ці співвідношення. Отже, очевидно, що у цьому випадку ефективність кольоропроби, а саме оперативність і наближеність до відбитків тиражу, є суттєво вища, ніж кольоропроба у традиційній поліграфії.

Далі, ЦДМ (струминні, на основі генерації крапель високим тиском з електростатичним керуванням) забезпечують друкування на відстані (до 100 мм) без силового на тиску на криволінійних (в т.ч. неміцних) поверхнях, які можуть рухатися. Це — друкування адрес, штрихкодів на упаковках; маркування промислових виробів, продуктів (наприклад, пташиних яєць). ЦДМ (типу плотер, координатограф) забезпечують друк на паперових, картонних, тканинних, пластмасових, скляних, металевих поверхнях, нанесених на товсті основи (до 80 мм). Це — окремі стенди з об'явами, розкладами, списками тощо.

Але розвиток цифрової поліграфії та впровадження ЦДМ *гальмується* такими фактори.

По-перше, ЦДМ мають високі ціни. Але, як відомо, що високі ціни в певній мірі підтримуються нині штучно, бо ж діє елементарний ринковий постулат виробника: «Є можливість без зайвого клопоту продати, наприклад, 10 машин по 2N тис. доларів. То для

чого ж турбуватися про зниження собівартості і ціни машини, аби продати 20 машин по N тис. доларів?» Але згодом ціни будуть знижуватися.

По-друге, ЦДМ вимагають «своїх» спеціальних матеріалів, у першу чергу фарб (тонерів), електрофоточутливих покриттів тощо.

По-третє, даються взнаки всі ті фактори (в т.ч. психологічна інерція), що заважають впровадження нового у будь-якій іншій галузі техніки. Не всім і не завжди зрозумілі функціональні особливості ЦДМ, не існує рекомендацій щодо відповідей на запитання: яким способом раціональніше (дешевше, швидше, якісніше) виготовити дану друковану продукцію залежно від виду видання, її обсягу, формату, тиражу і т.д. — на традиційних друкарських машинах, на ЦДМ? Якщо на ЦДМ, то — якій?

По-четверте, сучасні ЦДМ ще поступаються традиційним друкарським машинам за продуктивністю (кількістю відбитків в одиницю часу). Тому, наприклад, офсетні машини мають переваги при друкуванні великих тиражів. Хоча у час виготовлення продукції потрібно, звичайно, включати і час виготовлення друкарських форм, і час підготовки друкарської машини до друку.

По-п'яте, нині ще дуже мало фахівців, що усвідомили та оволоділи знаннями про цифрову поліграфію, цифрові технології і цифрові друкарські машини, які спроможні розробляти і впроваджувати нові технічні засоби та технології цифрової поліграфії.

Винаходи. Історія техніки та винаходів свідчить про те, що розвиток того чи іншого науково-технічного напрямку, який ґрунтується на одній або декількох близьких сферах знань, з часом породжує ознаки деградації технологій та технічних засобів цього напрямку. Відомо (наприклад, [1]), що найбільше реєструються винаходи, які ґрунтуються на основі знань одного спрямування або близьких один до одного. Частка їх становить майже 96 %. Такі винаходи рішуче не змінюють існуючий стан, а лише вносять певні вдосконалення. Спочатку, у своїй більшості, такі вдосконалення суттєві і позитивно впливають на рівень технологій і технічних засобів. Але з часом подібні вдосконалення врешті-решт призводять до сумнівних і навіть курйозних рішень.

Ось лише декілька прикладів з розвитку техніки і технологій в поліграфії. Це рядковідливні машини - лінотипи (дивне поєднання складних механічних вузлів, у т.ч. точних, з металургійним процесом лиття), які проіснували майже сто років (?!). Це спроби побудувати на основі лінотипів фотоскладальні апарати (і будували ж!). Це фотоскладальні апарати з матеріальними шрифтоносіями. Це спроби фрагментально автоматизувати

окремі процеси за допомогою механічних та електромеханічних пристроїв. Згадаймо, наприклад, пристрої для полегшення набору текстів, виконання операції виключки і т.п. До речі, сучасні фахівці (особливо з молодих) навіть не завжди розуміють, що таке операція виключки (і багато інших операцій). Так швидко звикли до того, що «все це виконує комп'ютер!» З усієї маси винаходів лише приблизно 4 % їх ґрунтуються на нових знаннях, або є самі джерелами нових знань. Такі винаходи є тією основою, яка забезпечує суттєвий прогрес техніки і врешті-решт принципово змінює рівень людської цивілізації.

Наведені твердження - очевидні, мають безліч доказів у будь якій іншій галузі науки і техніки.

Наприклад, розроблені в останні десятиліття принципово нові методи створення штучних матеріалів, оброблення матеріалів повністю змінили стан в усіх без винятку галузях техніки.

Схожий ефект дало винайдення способів квантової генерації монохроматичного електромагнітного випромінювання і створення на їх основі лазерної техніки; розвиток електронної техніки та її похідної - обчислювальної техніки... Впровадження цих досягнень у поліграфію на наших очах принципово змінюють її технології і технічні засоби.

Результати аналітичних досліджень

Сучасний стан поліграфії безперечно дуже високий (у порівнянні зі станом кількох десятиліть тому). Але все ж, у деякій мірі, окремі її технології та машини, нині нагадують, образно кажучи, ранішні рішення на кшталт... «побудувати фотоскладальні апарати на основі лінотипів». Нинішній стан поліграфії визначається досить високим рівнем автоматизації додрукарських та після друкарських процесів, автоматизацією інших процесів, апаратів, машин. Але як були сотні років тому в поліграфії чотири основні процеси (підготовка видання до друку, формні процеси, друк, післядрукарські процеси) так вони (у більшості випадків) залишились і донині. І все це на тлі існування цифрових друкарських технологій, принципово відмінних від традиційних технологій і технічних засобів.

НЕ 1.2 Фотографічні та фотоелектричні способи отримання копій.

1.2.1 Фотографічні процеси з використанням галогеносрібних

світлочутливих матеріалів

Фотографічний процес з використанням галогеносрібних (Ag-Cl,Br,I) матеріалів у репрографічних системах можна виконувати за такими технологічними схемами:

- 1) **двоступеневий** та **двообертний** процес (отримання позитивної копії з оригіналу за схемою оригінал—>негатив—>позитив) з прискореною обробкою експонованого матеріалу;
- 2) процес стабілізації галогеніду срібла, коли **копія після фіксування не промивається**;
- 3) **прямопозитивний** процес з оберненням (оригінал—позитив);
- 4) **прямопозитивний одноступеневий** процес з оберненням (оригінал—позитив), який ґрунтується на використанні ефекту Гершеля (ефект соляризації. Причиною соляризації є окислення центрів прихованого фотографічного зображення нейтральними атомами вільних галогенідів срібла при великих експозиціях;
- 5) **дифузійні процеси** перенесення срібла або барвника.

За технікою копіювання ці процеси можна виконувати **проекційним** або **контактним** методами та методом дифузійного перенесення зображення.

Проекційне копіювання виконують з використанням спеціальних фоторепродукційних пристроїв, а **контактне** копіювання - копіювальних пристроїв (рамок) у відбивному або прохідному світлі.

1.2.2 Галогеносрібні світлочутливі матеріали

Для отримання копій за допомогою проекційного та контактного копіювання використовують спеціальні фотопапери, а саме:

- для **проекційного** копіювання - фотостатний папір, документний фотопапір, фотокальку, креслярські фотоплівки;

- для **контактного** копіювання - рефлексні фотопапери, фотокальку, креслярські фотоплівки.

(**Фотостат** (від фото грец.statós—стоячий, нерухомий), установка для копіювання фотоспособом плоских оригіналів – креслень, рисунків та інш. Складається з фотографічного апарата, освітлювального пристрою. Фотостат дозволяє отримати збільшену, зменшену або як у оригінала копію на рулонній фотобумазі (негативній або позитивній).

1.2.2.1. Фотостатний папір

Фотостатний папір вирізняється відносно високою контрастністю та світлочутливістю. Цей папір ортохроматично сенсibiliзований (правильний колір) і використовується у спеціальних апаратах - фотостатах. Основні х-ки фотостатних паперів:

- світлочутливість - 100 од.;
- коефіцієнт контрастності - 1,7-3,2;
- оптична густина зображення - 1,1;
- ширина рулонів -330-1000 мм;
- довжина рулонів - 100 та 200 м.

Для отримання прямого зображення на копії перед об'єктивом встановлюють призму повного внутрішнього відбивання. У цьому ж апараті можуть проводитися всі процеси мокрого хіміко-фотографічного оброблення. У результаті виготовляється негативна копія (білі лінії та літери на чорному тлі).

1.2.2.2. Документний папір

Документні папери - бромосрібні середньоконтрастні та контрастні фотографічні папери, у яких світлочутливий шар нанесено на тонку (небаритовану) підкладку. Ці папери не скручуються, вони достатньо еластичні і можуть складатися без утворення лінії перегину. Це пояснюється меншою концентрацією желатину в емульсійному шарі порівняно з концентрацією у стандартних фотопаперах. Основні характеристики документних паперів:

- світлочутливість - 3-7 од.;
- коефіцієнт контрастності -1,9-3,0;
- оптична густина зображення - 1,3.

Застосування документних паперів найбільш ефективно для виготовлення копій книжок та журналів.

1.2.2.3. Фотокалька

Це фотографічний папір на тонкій прозорій підкладці. З обох боків фотокальки нанесено лакові (здебільшого нітроцелюлозні) покриття для зменшення деформації паперу під час хіміко-фотографічного оброблення та додання їй більшої прозорості. На протиемульсійний бік підкладки нанесено протиореольний шар, барвник якого вимивається у процесі хіміко-фотографічного оброблення кальки. Усунення ореолів відображення сприяє дотриманню відповідності товщини ліній на копії товщині ліній на оригіналі.

1.2.2.4. Рефлексний фотопapіp

Застосовується для розмноження різноманітної документації шляхом контактного копіювання.

Рефлексні папери призначені для копіювання ілюстраційної (переважно штрихової) і текстової документації, виконаної олівцем, тушшю, чорнилом або друкарською фарбою. Важливою перевагою рефлексного паперу є те, що з нього можна швидко відновлювати діапозитив на фотокальці (тобто, негатив виготовлений на рефлексному папері зберігається в архіві).

Для обробки рефлексних паперів можна використовувати будь-які проявники та фіксажі, що застосовуються у фотографічній практиці.

Рефлексні папери є трьох видів: прямі, «поліграфічні» та обернені.

При репродукуванні фотопapіp емульсійним шаром щільно прикладається до оригіналу і експонується через підкладку. Після проявлення одержують негативне зображення оригіналу. На рефлексному папері немає вуалі засвічування і забезпечується достатня різниця оптичних густин між темними та світлими ділянками зображення.

Ці папери вирізняються:

- високою прозорістю;
- слабо вираженою структурою підкладки (однорідною);
- високим коефіцієнтом контрастності.

Після хіміко-фотографічного оброблення копії отримують дзеркально обернений негатив, з якого можна виготовити прямий позитив (або тим самим рефлексним методом, або копіюванням у прохідному світлі з використанням діазопаперу). Для більшої прозорості перед копіюванням фотовідбиток необхідно промастити (імерсія). Виготовляти копії із застосуванням рефлексних паперів можна за денного освітлення, але без потрапляння на матеріал прямих сонячних променів.

Випускають обернений рефлексний папір, який має назви «директ-дублікат» або «аутопозитив». На ньому отримують позитивне зображення за допомогою процесу одноступеневого копіювання. У процесі виробництва ці папери завуальовані таким чином, що будь-яке додаткове освітлення тільки зменшує почорніння, отримуване у процесі проявлення (процес соляризації - ефект Гершеля). Після хіміко-фотографічного оброблення отримують дзеркально обернений позитив.

1.2.3. Прискорені процеси хіміко-фотографічного оброблення світлочутливих галогеносрібних матеріалів

Важливою х-кою репрографічних методів є їх оперативність, тому часто застосовують способи швидкого та надшвидкого оброблення фотографічних матеріалів з часом не більше 10 с, а іноді навіть менше однієї секунди. Загальна тривалість виготовлення готової копії в цьому випадку менше однієї хвилини. Така висока швидкість оброблення забезпечується:

- збільшенням лужності та концентрації проявника;
- підвищенням температури обробки;
- інтенсивним перемішуванням робочих розчинів;
- суміщенням стадій проявлення та фіксування;
- заміною стадій фіксування та промивання процесом стабілізації проявленого зображення;
- використанням матеріалів з проявною речовиною;
- використанням спеціальних сильнозадублених, тонкошарових та дрібнозернистих фотоматеріалів, а також спеціальної апаратури для їх обробки.

Швидкі проявники відрізняються від простих проявників високою концентрацією проявних речовин та високою лужністю. Для досягнення високих показників рН (до 13) застосовують їдкі луги в кількості до 40 г/л. Як проявник застосовують суміші фенідону (або метолу) та гідрохінону (або пірокатехіну). Для запобігання виникненню вуалі у проявник уводять достатню кількість противуальних речовин.

Проте висока лужність може спричинити надмірне розм'якшення емульсійного шару (особливо за високих температур проявлення) та подальше відшарування його від підкладки. Тому частіше застосовують проявники на основі амідолу з рівнем рН до 9,5.

Для швидких процесів оброблення зображення фіксують розчинами тіосульфату амонію за максимальної концентрації 15 %.

Одночасне проявлення та фіксування - ефективний спосіб скорочення тривалості процесу оброблення фотоматеріалів. Перевагами такого способу можна вважати також і «автоматичне» закінчення процесу: повне відновлення срібла та одночасне повне розчинення галогеніду срібла світлочутливого шару, що унеможливорює перепроявлення копії.

Проте цей спосіб має такі недоліки:

- нестабільність робочого розчину,
- зниження фотографічної чутливості,
- збільшення вуалі.

Фіксуючі проявники отримують введенням до швидкого проявника розчину галогеніду срібла, при цьому необхідно урегулювати швидкості проявлення (відновлення срібла) та його розчинення (фіксування). Якщо швидкість проявлення більша від швидкості фіксування, тоді зображення буде надмірно густим та завуальованим і, навпаки, а з перевищенням швидкості фіксування зображення буде недостатньо контрастним і окремих деталей у світах не буде.

Для швидкого процесу оброблення фотоматеріалів суттєве значення мають процеси стабілізації проявленого зображення. Сутність такої стабілізації полягає в перетворенні галогеніду срібла, який залишився в шарі після процесу проявлення, у несвітлочутливу, безколірну, прозору комплексну сполуку срібла. Для такої

стабілізації зазвичай використовують розчини аміачних сполук. Утворена сполука має один суттєвий недолік - вона стабільна лише в кислому середовищі. Якщо значення рН менше від семи одиниць, то за наявності іонів срібла вона розкладається з утворенням ціанаміду та сульфату срібла, що призводить до виникнення бурої вуалі.

1.2.4. Процеси фотографічного обернення зображень

Процеси фотографічного обернення зображень можна поділити на процеси хімічного й оптичного обернення. Хімічне обернення рекомендовано, наприклад, для хіміко-фотографічного оброблення зворотної фотокальки. Оптичне обернення ґрунтується на ефекті Гершеля і використовується для отримання позитивних зображень на зворотному фотопапері.

Узагальнений технологічний процес хімічного обернення зображень показано на рис. 6.2.

Процес експонування може виконуватись контактним або проекційним способом.

У результаті першого фотографічного проявлення у копіювальному шарі утворюється негативне зображення, яке руйнується на четвертій та шостій операціях. У результаті другого проявлення утворюється позитивне зображення.

Хімічне обернення фотографічного зображення - це багатостадійний та довготривалий (понад 30 хв) технологічний процес. Більш оперативний - оптичний процес обернення зображення, що ґрунтується на ефекті Гершеля або на явищі соляризації. Проте для оптичного обернення необхідно використовувати спеціальні світлочутливі фотоматеріали. Ці матеріали в процесі їх виготовлення завуальовуються таким чином, щоб їх експонування не збільшувало, а навпаки зменшувало їх почорніння, отримане під час проявлення.

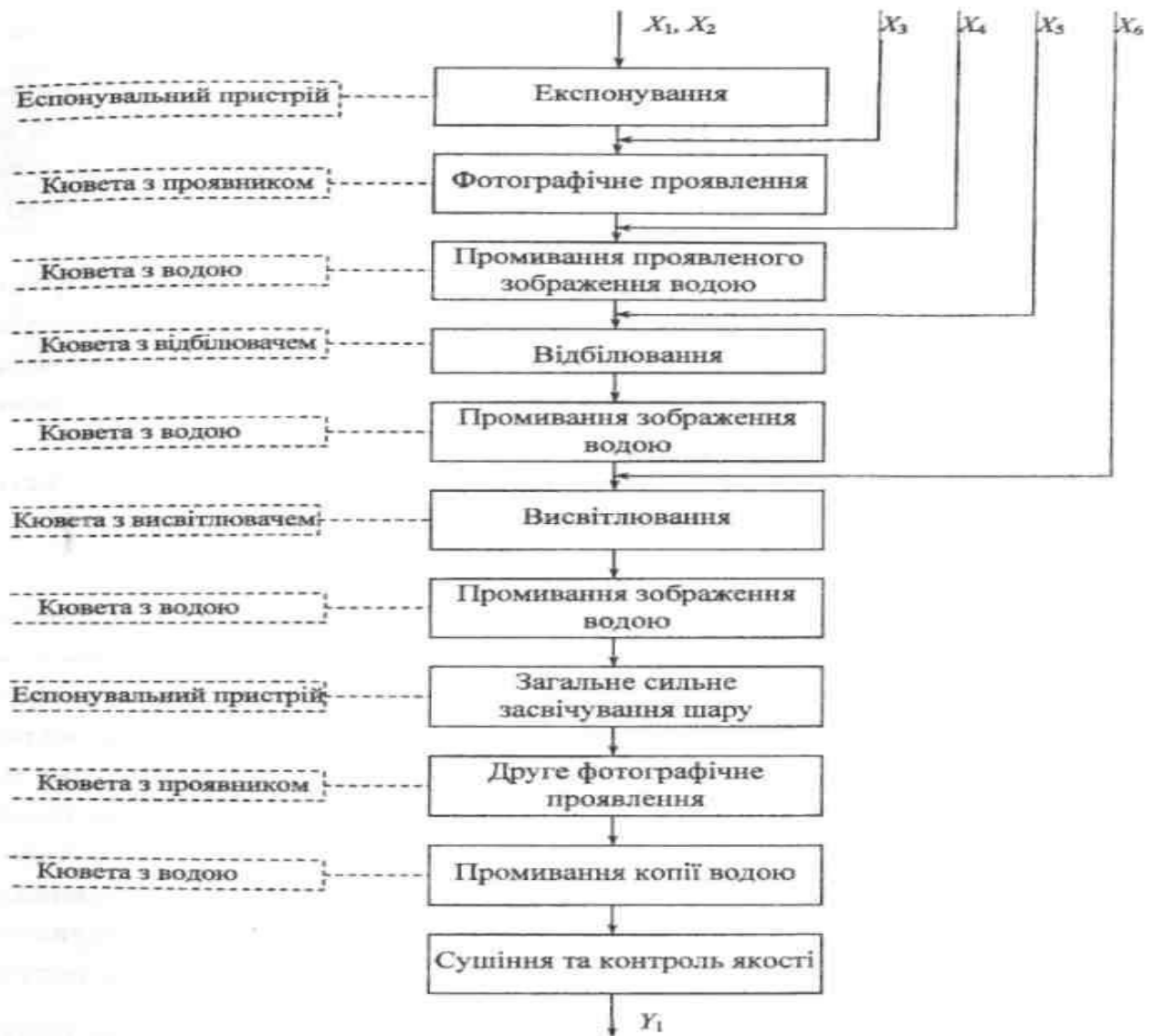


Рис. 2.1. Узагальнений технологічний процес фотографічного (хімічного) обернення зображень:

X_1 – оригінал; X_2 – копіювальний матеріал; X_3 – проявник; X_4 – вода;
 X_5 , X_6 – розчини для відбілювання та висвітлювання; Y_1 – копія

1.2.5. Способи дифузійного перенесення зображення

Способами дифузійного перенесення передбачено використання одночасного проявлення та фіксування зображення.

Способи дифузійного перенесення, зберігаючи основні переваги фотографічних процесів (високі фотографічні характеристики), вирізняються більшою продуктивністю (час виготовлення копії від 10 с до 2 хв), а також значно меншою собівартістю однієї копії. Ці процеси виконуються за допомогою портативних пристроїв у розсіяному світлі.

Способи дифузійного перенесення зображення можна класифікувати за

перенесенням срібла або перенесенням барвника.

1.2.5.1. Дифузійні процеси перенесення срібла

Це процеси фотографічного обернення зображення, оскільки позитивне зображення утворюється за рахунок неекспонованого галогеніду срібла негативного матеріалу в окремому спеціальному шарі, який не вміщує солей срібла і після закінчення процесу легко відділяється від негативного шару. Такий процес є одноступеневим та однованним. Комплект для отримання копії у дифузійному процесі складається з негативного матеріалу з галогенідосрібною світлочутливою емульсією та позитивного матеріалу з шаром колоїдного срібла, нечутливого до дії світла.

Експонований фотографічний емульсійний шар негативного матеріалу проявляється проявником, який містить розчинник галоїду срібла. Під час дифузійного перенесення негативний шар, що проявляється, тісно контактує з іншим несвітлочутливим шаром. У процесі проявлення негативного зображення в експонованому шарі одночасно розчиняється (у місцях, що відповідають позитивному зображенню) деяка кількість неекспонованого галоїду срібла, що дифундує у приймальний шар і там відновлюється проявником до чистого срібла внаслідок каталітичної дії зародків срібла або сірчаного срібла. Отже, у приймальному шарі створюється срібне позитивне зображення. (Для отримання нейтрально-чорного тону зображення у приймальний шар можна вводити бензотріазол, меркаптотетразол тощо.) Схему дифузійного процесу копіювання показано нарис. 6.3.

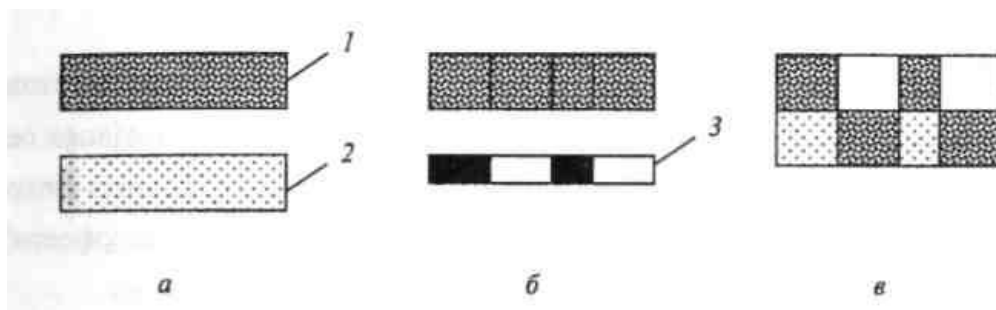


Рис. 1.3. Узагальнена схема дифузійного процесу копіювання: *а* - комплект для дифузійного перенесення; *б*—процес експонування; *в* - процес проявлення; *1* - негативний матеріал; *2* – позитивний (приймальний) матеріал; *3* – оригінал.

Принцип дифузійного перенесення використовують для отримання миттєвих знімків у самій знімальній камері фотоапаратами Polaroid з використанням спеціального фотокомплекту.

1.2.5.2. Способи дифузійного перенесення барвника

Один зі способів дифузійного перенесення барвника - «веріфакс», який розробила американська фірма «Кодак».

Цим способом документ експонують рефлексним (проекційним) способом на аркуш матричного паперу, покритий з одного боку товстим желатиновим шаром, що вміщує галогенід срібла, дубильну проявну речовину та копулятор (речовину, що у процесі проявлення утворює барвник). Після експонування матричний папір проходить через розчин лугу (активатор), який створює лужне середовище в желатиновому фотографічному шарі, сприяє проявленню ділянок зображення. У місцях, де відбувається проявлення, желатин дубиться, одночасно у всьому шарі утворюється барвник. Волога матриця притискається гумовим роликком до аркуша паперу, на який з незадублених ділянок желатину матриці переноситься барвник і таким чином створюється позитив. Цей процес не потребує ні фіксування, ні промивання проявленого шару. Якщо знову зволожити матрицю, можна отримати ще одну копію. Так, з однієї матриці можна отримати до шести копій.

Процес провадять в умовах розсіяного денного світла, час виготовлення першої копії - до однієї хвилини, наступних копій - декілька секунд. Якщо зображення переносять на прозору плівку, отримують фотоформу, а якщо на спеціальний гідрофільний папір - то мають офсетну друкарську форму з тираже стійкістю декілька тисяч відбитків.

Ще один спосіб має назву «контакт». Сутність способу полягає в тому, що, як за способом «веріфакс», у фотоемульсійний шар матричного паперу вводять галогенід срібла, дубильну проявну речовину, але в ньому немає копулятора. Копії проявляють за температури 29—30 °С у лужному розчині (здебільшого розчині соди), який вміщує також пом'якшувач (азотнокислі солі або сечовину). У процесі проявлення фотоемульсія в неекспонованих місцях розм'якшується і набуває здатності під невеликим тиском переноситись на будь-який папір, який вміщує відновник у лужному середовищі. Розм'якшена неекспонована емульсія з матриці під невеликим тиском переноситься на папір, галогенід срібла якої відновлюється до чистого срібла

і створює позитивне зображення. Після цього матрицю знову занурюють на деякий час у лужний розчин і знову отримують копію на папері.

Спосіб «копіхром» ґрунтується на відомому пінатипному процесі. Копії одержують на несвітлочутливому безсрібному папері в результаті всотування ним водорозчинних органічних барвників, які дифундують з матриці. Емульсійний шар матричного фотопаперу після експонування піддається дубильному проявленню, після чого матриця зафарбовується і контактує з приймальним папером. Барвник дифундує з матриці на приймальний папір з незадублених ділянок матриці. Приймальний папір являє собою фотопідкладку з шаром незадубленого желатину, який здатен поглинати водорозчинні органічні барвники. Після роз'єднання матриці та паперу на останньому залишається позитивна копія оригіналу. Перед отриманням наступної копії матрицю зволожують. З однієї матриці можна отримати до 50 копій.

1.2.5.3.Кольорові фотографічні системи для репрографії

Для звичайної кольорової фотографії застосовується папір зі спеціальними шарами, чутливими до випромінювання з різними довжинами хвилі. У цих шарах, залежно від довжини хвиль світла, формування кольорового зображення відбувається в різних шарах фотоматеріалу, а результатом є півтонове зображення (малюнок), з плавними колірними переходами. Крім того, на фотопапері можуть відтворюватися найдрібніші деталі. Роздільна здатність при застосуванні фотографічного паперу і аналогового нанесення зображення визначається тільки хіміко-фізичним складом шарів (рис. 5.8-1).

Залежно від інтенсивності світла і довжини хвилі експонуються випромінювання можливо отримати зображення з різною градацією оптичної щільності. Розміри частинок, хімічних компонентів знаходяться в діапазоні мікрометрів (0,1 ... 2,0 мкм) і нижче.

Перенесення кольорового зображення на фотопапір можна здійснювати проекційним або контактним способом.

При безконтактній технології фотографії йдеться про перетворення аналогової фотографії в цифрове зображення. Для цього застосовується

фотопапір, на який зображення записується за допомогою лазерної системи з цифровим управлінням. У фотографії і електрографія (рис. 5.7-3) застосовується папір зі спеціальними шарами. Формування зображення відбувається трьома складовими випромінювання червоного, зеленого і синього діапазонів. За допомогою керування інтенсивністю випромінювання окремих лазерних джерел у зображенні досягається необхідний колірний тон. Як джерела світла можуть використовуватися газові або напівпровідникові лазери.

Високоякісні системи працюють з газовими лазерами, наприклад, в наступному виконанні: червоний гелій-неоновий лазер (633 нм), зелений гелій-неоновий лазер (543 нм) і синій гелій-аргоновий лазер (458 нм). На рис. 1.4 представлена пробопечатна система, за допомогою якої можна виготовляти кольорові відбитки великого формату. Роздільна здатність даної системи складає до 4000 dpi.

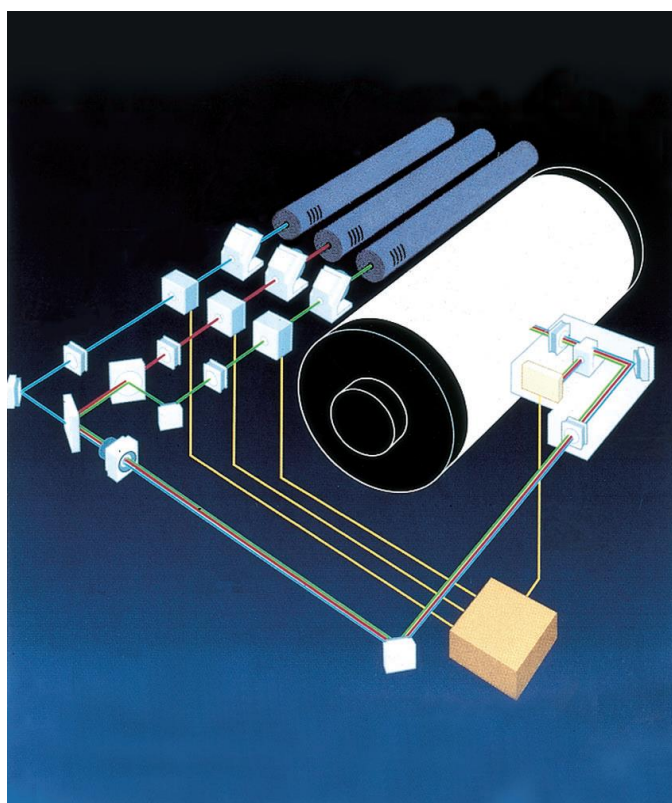


Рис. 1.4 Система для виготовлення кольорових відбитків великого формату.

Формування зображення проводиться за допомогою циліндра із зовнішнім закріпленням фотоматеріалу і системи розгортки з осьовим переміщенням. Після запису зображення залежно від використовуваного фотопаперу відбувається

процес проявлення (рис. 5.8-1, б). Завдяки розгортці з високою роздільною здатністю можуть репродукуватися растрові структури кольороподілених зображень для офсетного друку.

Фотографічний папір може відрізнятись від тиражного паперу структурою поверхні. Зокрема, необхідність узгодження білизни паперу призвело до розробок фотографічного паперу для пробного друку.

Принципи побудови цифрових систем для друку фотографічних зображень більшого формату відповідають принципам побудови систем технологій "Комп'ютер - фотоформа» або «Комп'ютер - друкарська форма». Існують системи з розміщенням фотопаперу на внутрішній поверхні барабана (рис. 3.2-85) а також планшетний (рис. 3.2-86), що дають можливість експонувати рулонний матеріал.

Для формування зображення в цифрових системах частково застосовуються діодні джерела світла LED (лінійки).

Цифровий друкуючий пристрій з використанням способу фотографії може бути гібридною безконтактною друкарською системою, в якій комбінуються способи термографії та фотографії. У процесі роботи (рис. 5.8-2, а) спочатку експонується світлочутливий папір-носій фарби трьома джерелами випромінювання (рис. 5.8-2, б). Приховане зображення проявляється шляхом подачі тепла при одночасному його перенесення на запечатуваний матеріал (спеціальний папір). Цим способом досягається дуже висока фотографічна якість зображення. Кількість рівнів градацій на елемент зображення становить 256.1. При розділенні 400 dpi репродукуються дрібні структури, досягається великий колірний обхват. Слід підкреслити, що в порівнянні з системою, показаної на рис. 5.8-1, у пристрої використовуються не газові лазери, а лазерні діоди. У нових технологіях використовуються в даний час створені лазерні діоди необхідної потужності.

Можна очікувати, що у взаємодії з цифровою фотографією будуть розроблені цифрові друкуючі пристрої, які при використанні фотографічної паперу дозволять отримувати відбитки малого формату для широкого застосування. Вони складуть конкуренцію для систем на основі струминної друку і термосублімацією.

НЕ 1.3 Електрофотографічні процеси.

3.1. Загальні відомості

Електростатичні або зарядові способи копіювання посідають одне з чільних місць не тільки у репрографії, але у формних та друкарських процесах оперативної поліграфії. Ці способи поділяють на електрофотографічні та електрографічні.

У процесі електрографії приховане зображення створюється вибіркоvim зарядженням не чутливого до світла копіювального матеріалу. Для цього використовують спосіб сканування електронним променем або спосіб зарядження через трафарет, зарядженою голкою тощо.

Електрофотографія - спосіб репрографії з використанням носіїв, електричні властивості яких змінюються під дією випромінення (ГОСТ 13.0.002-84). Тобто, електрофотографія - це сукупність способів одержання копій на фотопровідних матеріалах або з використанням цих матеріалів, що утворюють в умовах електростатичного зарядження (електризації) та експонування приховане електростатичне зображення.

Електрофотографія - найбільш поширений спосіб копіювання не тільки в репрографії, але й у сучасних поліграфічних системах отримання друкованого зображення.

Винахід електрофотографії належить Честеру Карлсону (США), який у квітні 1939 р. отримав патент на технологічний метод, названий ним ксерографією (від грец. "xeros" - сухий). У 1940 р. він запатентував перший ксерографічний апарат. Як фотопровідний матеріал він використав шар антрацену або сірки, нанесений на цинкову підкладку. Проте технічне впровадження цього способу розпочалось лише в 1944 р., а в 1950 р. у США було випущено першу модель ксерографічного копіювального апарата. Спосіб «електрофакс» розробила та реалізувала в 1954 р. фірма RCA (Radio Corporation of America).

Паралельно з розвитком зазначених способів розроблялись і інші:

- фотокондуктографія (ґрунтується на використанні явища стійкої провідності фотопровідників);
- одержання прихованого зображення на фотоелектретах;
- отримання міграційних зображень;
- спосіб Itec-RC.

Усі вони ґрунтуються на дії електростатичних сил та явищі фотопровідності матеріалів півпровідникового типу, тобто на збільшенні рухливості носіїв заряду в фотопровідному шарі під дією збуджуючого електромагнітного випромінювання.

3.2. Класифікація способів електрофотографії

Існують різні способи класифікації способів електрофотографії, проте у всіх з них повинно бути враховано такі фактори:

- технологічна схема отримання зображення;
- вид прихованого зображення, створюваного в цьому процесі, або фізичне явище, на якому ґрунтується створення прихованого зображення;
- спосіб проявлення;
- вид кінцевого продукту.

Узагальнену класифікацію способів електрофотографії наведено в таблиці.

За технологічною схемою створення зображення електрофотографічні способи поділяють на прямі та непрямі.

Таблиця 3.1

Класифікація електрофотографічних способів копіювання

Спосіб копіювання	Фотоелектричний ефект, який використовується у копіювальному процесі	Вид прихованого зображення	Спосіб проявлення прихованого зображення	Вид проявленого зображення
Ксерографія, електрофакс	Збільшення електропровідності шару під дією активісного випромінювання	Електростатичне (потенціальний рельєф)	Електростатичне осадження на елементах потенціального рельєфу заряджених частинок пігменту (картджу)	Світлопоглинальне
Електрофотографія на фотоелектретах	Стойка внутрішня поляризація фотопровідного шару	Те саме	Те саме	Те саме
Фотокопювальна графія	Стойка електропровідність фотопровідного шару	Електропровідне Електростатичне	Нанесення гальванопокриття, електростатичне осадження	— " —
Ресстрація на фототермомпластичних матеріалах	Збільшення електропровідності під дією світла	Електростатичне (потенціальний рельєф)	Термічне (нагрівання шару)	Світлорозсіювальне (механічний мікрорельєф)
Міграційний процес	Те саме	Вибіркове зарядження фотопровідних частинок, що дисперговані у зв'язуючому	Термічне (нагрівання шару) Розчинення зв'язуючого органічним розчинником	Світлорозсіювальне (міграція фотопровідних частинок у шар зв'язуючого на різну глибину)
Фотоелектрофоретичний процес	Фотоіндукований перерозподіл заряду ресструвальних частинок	Перерозподілені частинки, що несуть електричний заряд	Електростатичне притягнення заряджених ресструвальних частинок	Світлорозсіювальне
Фотоелектрична поляризація	Стікання зарядів під дією світла (фотострум)	Електростатичне	Контакт фотопровідного шару, який несе приховане зображення, з матеріалом, що полімеризується	Гідрофільно-гідрофобне або світлорозсіювальне
Itek RS процес	Збільшення електропровідності під дією світла	Електропровідне Приховане срібне	Контакт фотопровідного шару з розчином солі срібла та фотографічна обробка	Світлопоглинальне

Згідно з прямими способами приховане та видиме зображення створюють безпосередньо на фотопровідному матеріалі. Це:

- одержання копій на фотопровідних паперах (електрофакс);
- одержання міграційного зображення,
- фототермопластичний запис;
- фотокондуктографія та РІР-процес.

Відповідно до непрямих способів приховане та проявлене зображення одержують на фотопровідному матеріалі, який виконує функції матричного матеріалу, з подальшим перенесенням та закріпленням зображення на нефотопровідному матеріалі. Це способи:

- «ксерографія», Canon, HP, Minolta, Oki;
- TESI (Transfer of Electrostatic Image).

Найбільшого застосування на практиці набули класичні способи типу «ксерографія» (непрямий) та «електрофакс» (прямий). Інші можна віднести до нетрадиційних електрофотографічних способів.

3.3. Основи створення зображення електрофотографічними способами

Створення електрофотографічного зображення ґрунтується на зміні фізичних властивостей електрофотографічних матеріалів.

Створення електрофотографічного зображення на етапах реєстрації інформації та її візуалізації відбувається з перетворенням сигналу відповідно до заданої сигнальної функції. Воно залежить від взаємного розміщення елементів спроектованого зображення на фотопровідниковий матеріал та умов експонування і зумовлює зміну електричних властивостей його шару: заряду, потенціалу, сили струму. Ці зміни і створюють приховане зображення, яке візуалізується за допомогою зарядженого носія - тонера.

Електрофотографія ґрунтується головним чином на явищі фотоефекту, яке призводить до збільшення електричної провідності фотопровідного матеріалу внаслідок взаємодії з ним потоку електромагнітного випромінення. Багато неорганічних та органічних сполук є фотопровідниками, що використовуються для створення електрофотографічних систем. Це - чистий селен (Se), селен з домішками (As_2Se , $CdSe$), оксид цинку (ZnO), сірчаній кадмій (CdS),

полівінілкарбазол, етилкарбазол тощо. Фотопровідність цих матеріалів проявляється тоді, коли під дією світла утворюються вільні носії заряду (струму) - частинки, які здатні до напрямленого перенесення електричного заряду певного знака.

В електрофотографічних процесах приховане електростатичне зображення на поверхні копіювального матеріалу формується у результаті вибіркового експонування рівномірно зарядженого фотопровідного шару. На цьому принципі ґрунтуються найбільш поширені класичні способи електрофотографії - ксерографія та електрофакс (тобто отримання зображення на напівпровідникових шарах (оксиген цинку) з паперовою основою), а також інші процеси (табл. 3.1).

Технологічний процес виготовлення копій електрофотографічним способом складається із зарядження фотопровідного шару, експонування, проявлення прихованого електростатичного зображення і фіксування проявленого зображення. У ксерографії проявлене зображення переноситься на приймальний матеріал (папір) з наступним його фіксуванням; згідно зі способом «електрофакс» приховане зображення проявляється безпосередньо на фотопровідному шарі осадженням заряджених частинок проявника.

У фотокондуктографії використовується явище стійкої провідності, тобто властивість деяких фотопровідників зберігати провідність після припинення процесу експонування.

Способи електрофотографії на фотоелектретах виконують з використанням фотопровідних матеріалів, які в результаті одночасної дії актинічного електромагнітного випромінення та електричного поля поляризуються, при цьому носії зарядів концентруються на поверхні (межах) фотопровідних частинок. Ця поляризація зберігається протягом кількох годин.

Міграційний процес полягає в тому, що заряд досягає фотопровідної частинки в результаті експонування, при цьому експоновані ділянки шару стають зарядженими.

Відповідно до фотоелектрофоретичного способу зображення формується внаслідок переміщення забарвлених фотопровідних частинок за сумісної дії електричного поля та світла.

Згідно із способом фотоелектролітичної полімеризації приховане зображення

створюється так само, як і за способами ксерографії та «електрофакс», проте елементи його прихованого зображення створюються лише на опромінених ділянках фотопровідного шару.

Процес створення прихованого зображення способом Itec RS складається з двох стадій: створення електропровідного зображення на опромінених світлом ділянках фотопровідника та відновлення срібла з йонного стану до нейтрального на збуджених ділянках фотопровідника.

3.4. Класичні електрофотографічні способи

Найпоширеніший електрофотографічний спосіб - це ксерографія, що має такі переваги:

- виготовлення копій високої якості з відносно низькою собівартістю;
- висока швидкість одержання копій;
- можливість відтворення штрихів і тексту на копії будь-якого заданого кольору з добиранням проявника (картриджа) відповідного кольору;
- друкування на паперах з різною масою квадратного метра та на гладких матеріалах;
- проявлення без рідкого проявника;
- виконання процесу в умовах денного світла.

Як світлочутливі фотопровідні матеріали використовують шари аморфного селену, а також селену з домішками телуру, арсену і талію, що нанесені на металеву (здебільшого алюмінієву) підкладку.

Класична технологічна схема отримання копій ксерографічним способом така:

- зарядження фотопровідника (позитивними зарядами) у коронному розряді. Для цього фотопровідний шар переміщується через спеціальний пристрій з одним або декількома металевими дротами, що перебувають під потенціалом, який викликає тихий розряд (корону);
- експонування шару через позитив (або іншим способом) світлом відповідного спектрального складу, у результаті чого на освітлених ділянках, де з'являється фотопровідність шару, заряди стікають через металеву підкладку, а на неосвітлених ділянках залишаються у незмінній кількості. У результаті створюється приховане зображення;

- проявлення (візуалізація) прихованого зображення за допомогою порошку, який має протилежний заряд на відміну від поверхні шару - частинки порошку прилипають до ділянок поверхні шару, який має заряд, і на поверхні шару створюється видиме зображення;
- перенесення зображення з шару на приймальний матеріал, який заздалегідь заряджається зарядом того ж знака, але вищого потенціалу, при цьому папір (матеріал) забирає більшу частину порошку;
- часткова нейтралізація поляризації аркуша паперу для полегшення його відокремлення від поверхні фотопровідника;
- закріплення зображення на копії (оплавленням смоли) під дією інфрачервоних променів (ІЧ-опромінення);
- очищення шару від залишків порошку та зняття потенціалу.

Узагальнену схему виготовлення копій непрямим електрофотографічним способом показано нарис. 3.1.



Рис. 3.1. Узагальнена схема одержання копії непрямим електрофотографічним способом

У процесі «електрофакс» через відсутність операції перенесення застосовують оптичне обернення за схемою «негатив-позитив».

3.4.1. Технологічні операції виготовлення копій непрямим електрофотографічним способом

У електрофотографії запис зображення проводиться на фоторецепторі, що складається з струмопровідної підкладки і тонкого шару високоомного фотопровідника. У темряві фотопровідник - ізолятор, здатний утримувати на своїй поверхні заряд. При опроміненні світлом він набуває провідні властивості, і заряд в освітлених ділянках стікає, залишаючись тільки там, де світло не падало. Для того щоб на фоторецепторі можна було записати зображення, підкладка повинна бути заземлена, а поверхня фотопровідника зарядженою (рис.3.2).

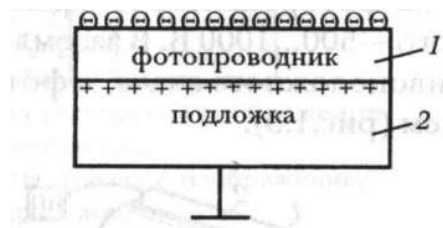


Рис. 3.2. Схема фоторецептора: заряджений фотопровідниковий шар, 2-заземлена підкладка

Фоторецептори розрізняються між собою фотопровідниковим шаром і конструкцією. В даний час в основному використовують органічні фотопровідники і гідрований аморфний кремній a-Si:H

По конструкції розрізняють циліндричні і стрічкові фоторецептори (рис.3.3).

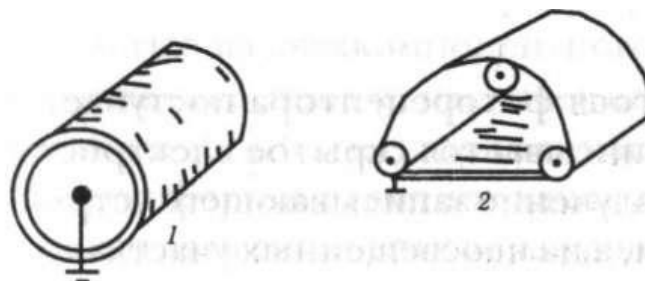


Рис. 3.3. Види фоторецепторів: 1 - циліндричний фоторецептор, 2- стрічковий фоторецептор

Навколо фоторецептора розташовуються функціональні вузли, які виконують всі операції електрофотографічного процесу, за винятком закріплення копій.

Електрофотографічний процес складається з шести стадій: зарядки, експонування, проявлення, переносу тонерного зображення з фоторецептора на друкований матеріал, закріплення зображення на відтиску та очищення фоторецептора.)

Зарядження фотопровідника. Фотопровідник заряджається за допомогою коротронів або швидкотронів - коронним розрядом. *Коронними розрядами* називають спеціальний тип тліючого газового розряду, що створюється під дією великих градієнтів високої напруги (постійної або змінної) біля електродів певної геометричної форми: на тонких вістрях, дроті, металевих сітках. Частина іонізованих молекул із зарядом одного знака перетікає до поверхні фотопровідного шару і заряджає його. Потужність коронного пристрою суттєво залежить від його геометрії та складу газової фази. В електрографії для заряджання застосовують електроди у вигляді довгого дроту діаметром 0,02-0,10 мм або металеві щітки з корозістійкого матеріалу; відстань від місця коронного розряду до поверхні шару становить 0,5-2,0 мм. Додаткове застосування сіток та захисних екранів дозволяє краще впливати на процес, забезпечувати більшу рівномірність розподілу зарядів, а також надійний контроль перебігу процесу зарядження. При цьому вдається уникнути перезарядження шарів та нерівномірності розподілу заряду, викликані коливанням діаметра дроту та особливостями коронарного пристрою.

У процесі перенесення заряду електрофотографічний шар переміщується під пристроєм, який створює коронний розряд з напругою на дротах 7-10 кВ.

У полі коронного розряду між дротом та поверхнею фотопровідника в напрямі останньої рухаються іонізовані молекули й атоми повітря, які захоплюються у темряві поверхнею шару. У разі негативного коронного розряду в атмосфері утворюються іони кисню, а позитивного - іони нітрогену (азоту). Позитивно та негативно заряджені іони адсорбуються поверхнею фотопровідного шару, при цьому селенова пластина (циліндр) отримує відповідний заряд. Селенові шари заряджають позитивно, фотопровідні папери з покриттям із дисперсії оксиду цинку у

зв'язуючому шарі - негативно. Потенціал зарядженої поверхні складає 500-1000В.

У заземленій підкладці індукується заряд протилежного знаку, і фотопровідник виявляється під напругою (рис.3.4).

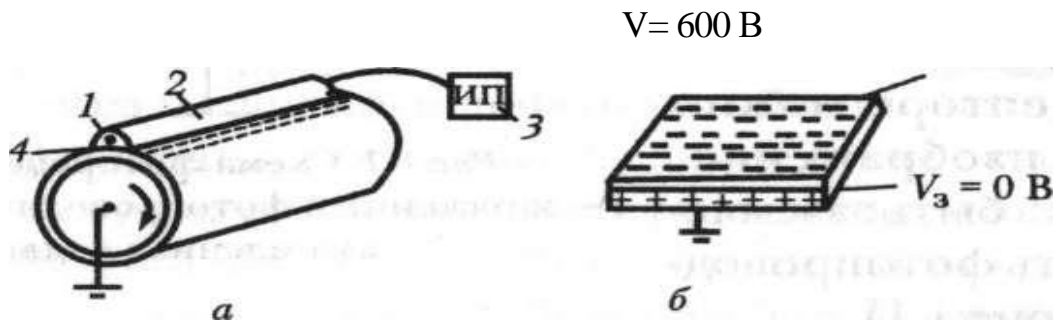


Рис. 3.4. Схема зарядки фоторецептора (а) і зарядженої ділянки (б): 1 – коронний дріт скоротрона, 2 - скоротрон, 2 - фотопровідниковий шар, 3 - високовольтне джерело живлення, 4 - заземлена підкладка, V- потенціали

Експонування. Після зарядження фотопровідного шару виконують експонування оригіналу на фотопровідний шар. У результаті експонування електропровідність освітлених ділянок фотопровідного шару збільшується в 100 - 1000 разів, що спричиняє розрядження цих ділянок. На інших ділянках заряд залишається. Таким чином створюється приховане зображення, яке відповідає оптичним густинам оригіналу. Основна умова проходження процесу експонування - поглинання шаром світла під час експонування. Тому спектральна чутливість фотопровідника і визначає характеристики джерела опромінення.

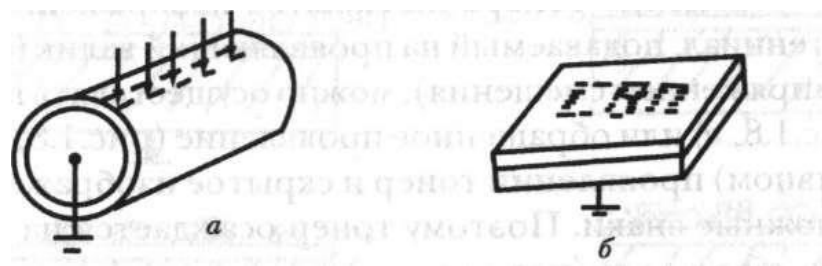


Рис. 3.5. Схеми експонування (а) і прихованого електростатичного зображення (б)

Для проєкційного експонування фотопровідникового приймального шару застосовують галогенові лампи, флуоресцентні джерела світла або лампи-спалахи, лазери, світлодіоди або електронно-промені трубки. Розрізняють три види експонування: експонування всього поля, рядків або точок. Для ефективного

експонування необхідно, щоб спектр джерела світла відповідав зоні чутливості фотопровідного шару. Оптичні пристрої системи впливають як на продуктивність, так і на розміри копіювального апарата в цілому. У ксероксах застосовують дзеркальну, волоконну оптику або багатократні (френсельні) лінзи.

В аналогових копіювальних апаратах джерелом світла є галогенна лампа розжарювання, а в цифровій апаратури - інфрачервоний лазер або світлодіодна лінійка. Довжина хвилі випромінювання лазера і світлодіодів лежить в ближній ІК-області спектра (740...780 нм).

Якщо передбачається пряме (позитивне) проявлення, розрядженими будуть прогалини, а якщо проявлення буде негативним, розряджаються ділянки зображення (мал. 6). Отримане зарядове зображення називається прихованим електростатичним зображенням.

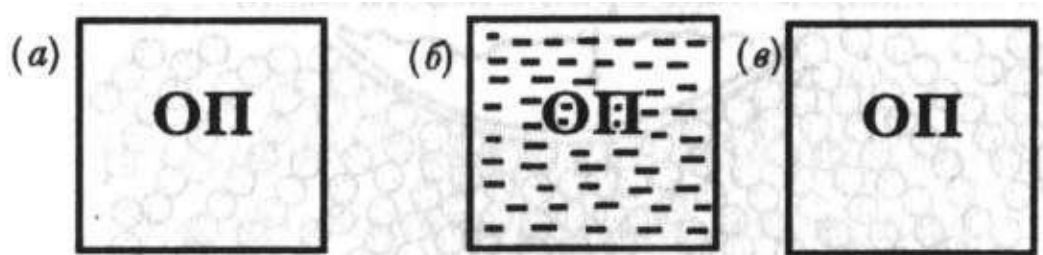


Рис. 3.6. Негативне приховане електростатичне зображення для оберненого проявлення: а - оригінал, б- приховане електростатичне зображення, в - тонерне зображення.

Проявлення прихованого електростатичного зображення.

Проявлення полягає у притяганні до зарядженої поверхні фотопровідника (прихованого зображення) дрібних забарвлених частинок тонера. Взаємодія між прихованим зображенням та частинками тонера відбувається тільки там, де на поверхні фотопровідника утворився електричний заряд. Ця взаємодія поблизу падіння просторових градієнтів густини поверхневого заряду зумовлює виникнення крайового ефекту.

Матеріал тонера можна наносити сухим способом, або із суспензії у сильноізолюючій (неполярній органічній) речовині (електрофоретичне або

рідинне проявлення).

Можливі методи проявлення:

- каскадне (ступеневе) проявлення;
- проявлення за допомогою магнітного пензля;
- аерозольне проявлення (проявлення у порошковій хмарі),
- занурення зображення у рідкий проявник або його розбризкування.

Змінюючи полярність порошоків (картриджів) можна отримувати як позитивне, так і негативне зображення.

Практичного застосування із сухих способів проявлення набули каскадний, магнітним пензлем та порошковою хмарою.

Для сухого проявлення використовують одно- та двокомпонентні сухі проявники. Двокомпонентні проявники складаються з частинок великого діаметра (до 1 мм) і порошку тонера (розмір частинок 5-20 мкм). Перші слугують носіями тонера і складаються зі скляних (полімерних) кульок, що вкриті пластмасою. Тонерами є різні забарвлені синтетичні полімери, пігменти, природні смоли тощо.

Однокомпонентні проявники не мають носіїв тонера, а барвники, магнітні пігменти та домішки вводять до складу самого полімеру.

Каскадне проявлення ґрунтується на трибоелектричному ефекті і його використовують для проявлення штрихових зображень. *(Ефект зумовлений встановленням і розривом контакту між тілами при терті. При встановленні контакту принаймі в окремих ділянках поверхонь відбувається процес адгезії - злипання поверхонь тіл. Внаслідок злипання носіїв заряду з одного матеріалу частково переходять в інший, прагнучи вирівняти електрохімічні потенціали. При швидкому розриві контакту частина носіїв заряду залишається в чужому тілі, створюючи таким чином надлишковий заряд.)* При цьому тонер прокочують (каскадують) по поверхні електрофотографічного шару. Для проявлення за схемою «позитив - позитив» використовують тонер, який у процесі трибоелектризації отримує заряд, що протилежний заряду шару. Для проявлення за схемою «позитив - негатив» використовують тонер з тим самим зарядом, що й шару.

Магнітний пензель утворюється частинками двокомпонентного проявника

навколо полюса постійного магніту. Проявник складається із суміші частинок феромагнітного матеріалу (наприклад, залізних стружок) з пігментованими частинками смоли, які для отримання суміші різнойменно електризуються. Магнітний пензель переміщують уздовж поверхні з прихованим зображенням, на елементах якого осідають частинки забарвленої смоли, що мають протилежний заряд. Цей спосіб застосовують для проявлення фотопровідних паперів, наприклад в електрокопіювальних апаратах фірми Charles Bruning (США).

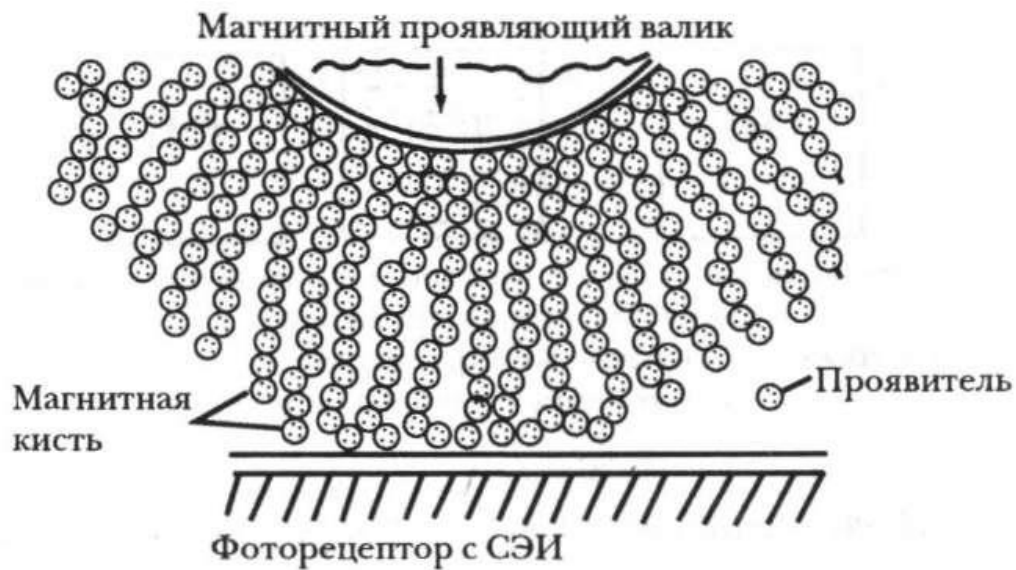


Рис. 3.7. Проявлення прихованого електростатичного зображення магнітним пензлем з двокомпонентного проявника.

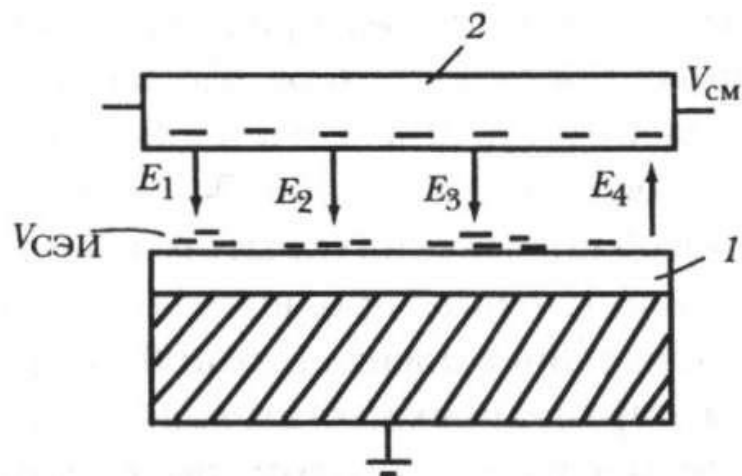


Рис. 3.8. Проявляюче поле в зоні проявлення: E - напруженість електричного поля, V - потенціал зарядженої поверхні щодо землі (заземленою підкладки).

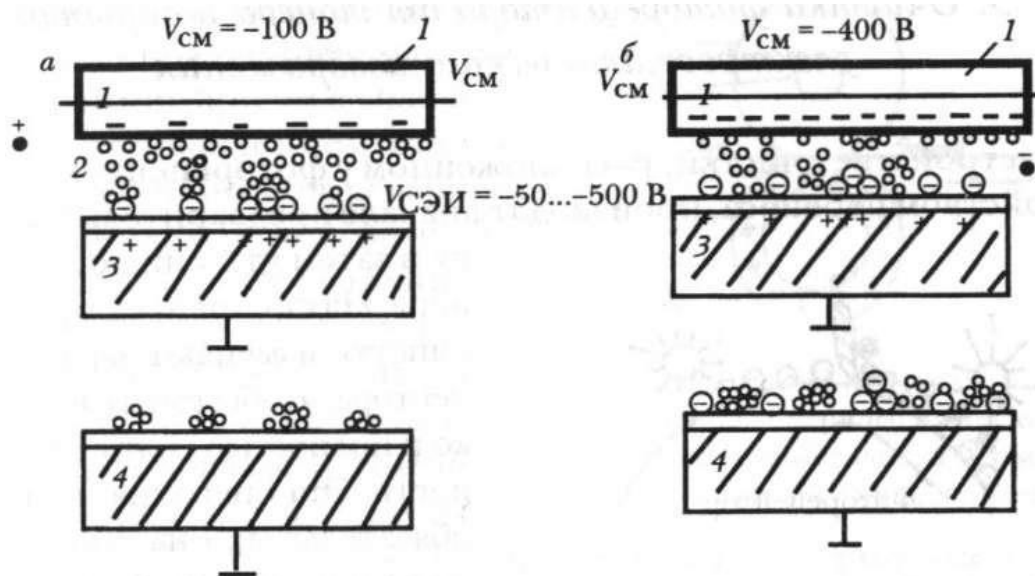


Рис. 3.9. Пряме (а) і обернене (б) проявлення прихованого електростатичного зображення (ПЕЗ): 1 - проявляє валик з проявником, 2 - тонер, 3 - фоторецептор з ПЕЗ, 4 - фоторецептор з тонерним зображенням.

Для проявлення порошковою хмарою застосовують однокомпонентний проявник. Хмара виникає у процесі вдування порошку в проявну камеру через систему трубок малого діаметра. Хмару продувають між близько розміщеними проявним електродом та ксерографічною пластиною, при цьому до проявного електрода прикладають потенціал, полярність якого протилежна полярності прихованого зображення; частинки проявника несуть заряди обох знаків.

Основні недоліки сухих методів проявлення: отримання ефекту «вкраплення» - білих цяток на чорному фоні, а також отримання чорних цяток на білому фоні, що знижує якість півтонових зображень.

Проявлення за допомогою рідких проявників розбризкуванням вирізняється від сухого проявлення лише тим, що процес проявлення виконується забарвленим розчином, який розбризкується з пульверизатора.

У процесі проявлення за допомогою занурення фотопровідного матеріалу в дисперсний розчин з рідким проявником, який складається з дрібнодисперсних частинок у рідкому електроізолювальному розчині, на елементах прихованого зображення (в результаті електрофорезу) осідають заряджені частинки пігменту.

Склад проявника:

- рідкий електроізолюючий (високоомний) носій;

- забарвлені частинки (пігмент) діаметром 0,1-40,0 мкм;
- речовини, що заряджають частинки проявника в процесі диспергування шару та регулюють заряд проявника і створюють оболонку навколо частинок проявника, змінюючи їх поверхневі властивості і тим самим допомагають їх зарядженню.

Як рідкий носій застосовують аліфатичні вуглеводи (наприклад, бензин, бензол, ксилол, уайт-спірит тощо).

За вищевказаних способів проявлення ефекту «вкраплення» не спостерігається, проте час одержання готової копії подовжується, оскільки потрібно витратити додатковий час на її сушіння.

Перенесення зображення та його закріплення.

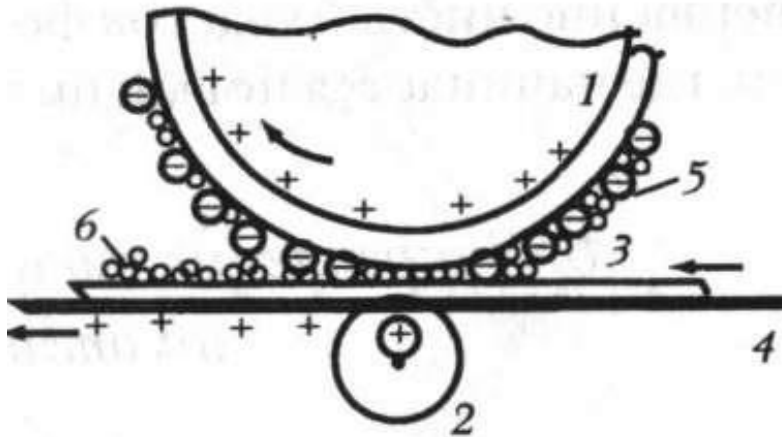


Рис. 3.10. Схема перенесення зображення з зарядним валиком: 1 - фоторецептор, 2- зарядний валик, 3 - папір на ремені, 4, 5 - тонер на фоторецепторі, 6- копія.

Перенесення зображення з фоторецептора на папір (або плівку) проводиться електричним полем. Для цього папір приводять в контакт з фоторецептором і на зворотну сторону паперу наносять заряд, протилежний за знаком до заряду тонера.

Зарядка здійснюється зарядним валиком або коротроном переносу (мал. 1.9). На папір переноситься близько 80% тонера. Після цієї операції копія відділяється від фоторецептора і переміщається в пристрій закріплення. Ділянка фоторецептора, що вийшов із зони перенесення, переміщається в зону очищення.

Електрофотографічне зображення переноситься на папір за допомогою електростатичного або адгезійного способів.

Згідно з електростатичним способом аркуш паперу заряджається певним зарядом і під час його проходження під фотопровідним циліндром (пластиною), на якому є проявлене зображення, воно переноситься на папір. Якщо папір протилежно заряджений відносно заряду тонера, отримують позитивне зображення на копії, однаково заряджені папір і тонер створюють негативне зображення.

Адгезійний процес ґрунтується на застосуванні паперу, один бік якого вкритий адгезійним шаром. Адгезійні сили цього шару утримують порошкове зображення на поверхні паперу для прилипання до поверхні ксерографічної пластини. Папір накладають адгезійним шаром на порошкове зображення та прикочують його еластичним валиком для забезпечення достатнього контакту. Як адгезійний матеріал застосовують зволожений перевідний папір.

Фіксування зображення виконують такими способами: підвищенням тиску, збільшенням температури; одночасним впливом теплоти та тиску; дією розчинників; хімічною реакцією.

Після перенесення тонерне зображення утримується на папері електростатичним полем, так як на звороті паперу зберігається залишковий заряд. Коли заряд стече, порошок тонера почне обсіпатися з паперу. Тому порошкове зображення треба закріпити, що в сучасній апаратурі робиться тільки термічними методами.

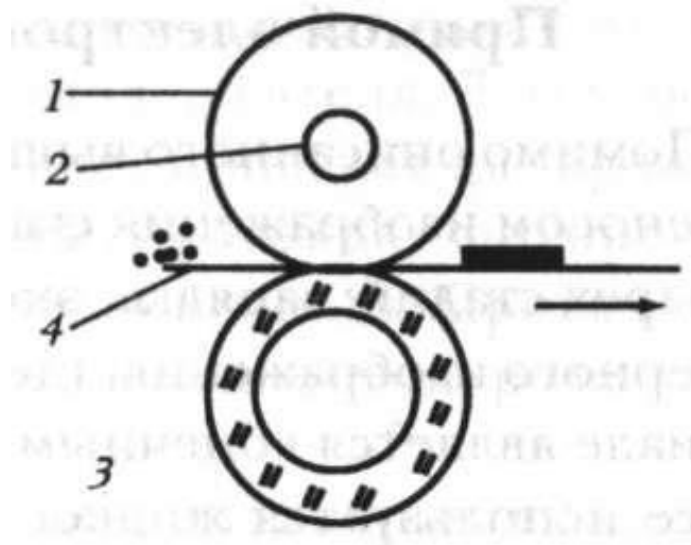


Рис.3.11. Схема термосилового закріплення тонерного зображення: 1 – ф'юзерний валик, 2 – лампа, 3 – притискної валик, 4 – копія

Найпоширенішим способом є термосилове закріплення зображення, яке проводиться у ф'юзерному пристрої (резиновий валик з нагрівачем у середині). Основними його компонентами є гарячий ф'юзерний валик і притискний валик. Відбиток проходить між цими валиками, притискаючись зображенням до ф'юзерного валику (рис. 31.11). Тонер розігрівається і починає плавитися. Його оплавлені частинки зливаються один з одним в суцільну плівку, і під тиском валиків частина тонера проникає в поверхневі пори паперу. На виході із зони контакту тонерне зображення твердне, відділяється від ф'юзерного валика пальцями відділення, і відбиток виводиться з машини.

Зображення, що проявлені за допомогою рідких проявників, можуть бути перенесені з використанням притиску, аналогічного друкарському процесу. Проте перенесення необхідно виконати до того, як зображення висохне. Такі зображення з вологих копій можна переносити не лише на папір, але й на дерев'яні поверхні, пластмасові матеріали, кераміку тощо.

Порошкові проявники сучасних копіювальних апаратів складаються з плавких смол. Проявники такого типу закріплюються на копії під дією температури - нагріванням до їх плавлення. Є деякі різновиди закріплення зображення на копії, зокрема дією на них парів розчинників, які розм'якшують частинки проявника і тим самим закріплюють їх на копії; вдавленням тонера у папір.

Зображення, отримане із застосуванням неплавких проявників, закріплюється на відбитку нанесенням прозорих лакових покриттів.

За адгезійного перенесення зображення проявник всотується в адгезійне покриття і після висушування копія зображення закріплюється.

Існують і інші методи проявлення, перенесення та закріплення зображення на копії. Наприклад, відомі способи проявлення прихованого зображення порошком стеарату заліза. Аркуш паперу, який змочується спиртовим розчином галієвої кислоти, контактує з проявленим зображенням, і в результаті реакції на папері створюється зображення чорного кольору. Інший метод - отримання копії із застосуванням проявників з мікрокапсулами рідких фарб. Під тиском капсули руйнуються і на папері залишається проявлене (фарбове) зображення.

Очищення поверхні фотопровідного циліндра (пластини). Старіння фотопровідного шару.

Для отримання другої копії з фотопровідного циліндра або пластини необхідно видалити залишки порошкового проявника.

У пристрої очищення, розташованому біля фоторецептора слідом за пристроєм перенесення, виконують спочатку попередню очистку, а потім видалення залишків тонера. На стадії попереднього очищення змінюють заряд фоторецептори, щоб тонер міг бути легко і повністю знятий з його поверхні. Ця операція не є обов'язковою, вона проводиться не у всіх електрофотографічних пристроях. Видалення тонера проводиться ракелем або щіткою. У сучасних пристроях використовується очищення зарядженими щітками. Знятий з фоторецептори тонер переміщується в ємність для відпрацьованого тонера.

У ксерографічних апаратах для цього використовують хутрянні щітки. Якщо видалити залишки порошку через його підвищену липкість неможливо, застосовують очищення гранульованим матеріалом, який у процесі каскадного проявлення поводить себе як носій і притягує частинки тонера завдяки трибоелектризації.

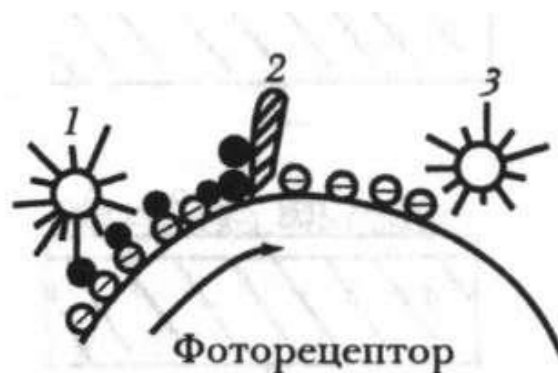


Рис. 3.12. Очищення фоторецепторів: 1 - попереднє очищення, 2 - очищення від тонера, 3 - стирання заряду.

У разі тривалого використання фотопровідникового шару на його поверхні виникає плівка проявника, яку треба змивати за допомогою певних розчинників (наприклад, ізопропіловим спиртом).

Після адгезійного перенесення зображення порошковий проявник майже не помітний на шарі, проте під час відтворення тонових зображень навіть незначні кількості залишкового проявника погіршують якість копій, тому після одержання кожної копії шар промивають розчинником. В автоматичних апаратах

очищення виконується хутряними щітками, а залишки проявника відсмоктуються.

Фотопровідний шар інших апаратів після перенесення зображення наświetлюють актинічним світлом, що поліпшує ефективність очищення поверхні фотопровідного шару від проявника та його розрядження.

Тривала експлуатація фотопровідних шарів (наприклад, селенових шарів) призводить до зменшення їх електрофотографічних властивостей - знижується граничний потенціал, світлочутливість тощо (відбувається «старіння» та «втома» фотопровідного шару). На це впливає чимало чинників: кількість зроблених копій та кількість очищень від залишків проявника, періодичність очищення за допомогою розчинників. Проте основна причина «старіння» селенових шарів - кристалізація поверхневого селенового шару. Один з найбільш дієвих засобів боротьби з кристалізацією селенового шару полягає в уведенні до нього відповідних присадок, які дозволяють регулювати (зменшувати) швидкість процесу кристалізації. Так, домішки сірки знижують процес кристалізації, домішки телуру (якщо їх нанести на підкладку напиленням) - підвищують кристалічність шару, але поліпшують збережаність шарів без подальшого зростання кристалічної фази. Селен кристалізується головним чином на ділянках з дефектами поверхні (тріщини, подряпини) і значно пришвидшується через розчинення селенового шару.

Очищення фотопровідного шару призводить до збільшення дефектів поверхні та підтравлення, набухання або розчинення селену в розчинниках під дією молекул неполярних або слабополярних розчинників (бензолу, толуолу тощо). Промивання за допомогою полярних розчинників (дистильованою водою, ацетоном тощо) підвищує робочі властивості селенових шарів, оскільки вони забирають діоксид селену, наявність якого збільшує поверхневу електропровідність шару.

На рис. 1.12 показано розташування функціональних вузлів відносно циліндричного фоторецептора. Як видно з малюнка, операції здійснюються на вузьких смужках оберту фоторецептора, кожна з яких послідовно проходить через всі операції електрофотографічного процесу (крім термозакріплення). Одночасно на різних ділянках фоторецептори відбуваються різні процеси.

Процес йде циклами, зображення для кожного відбитка тиражу записується заново. Це робить можливим друк тиражі із змінними даними.

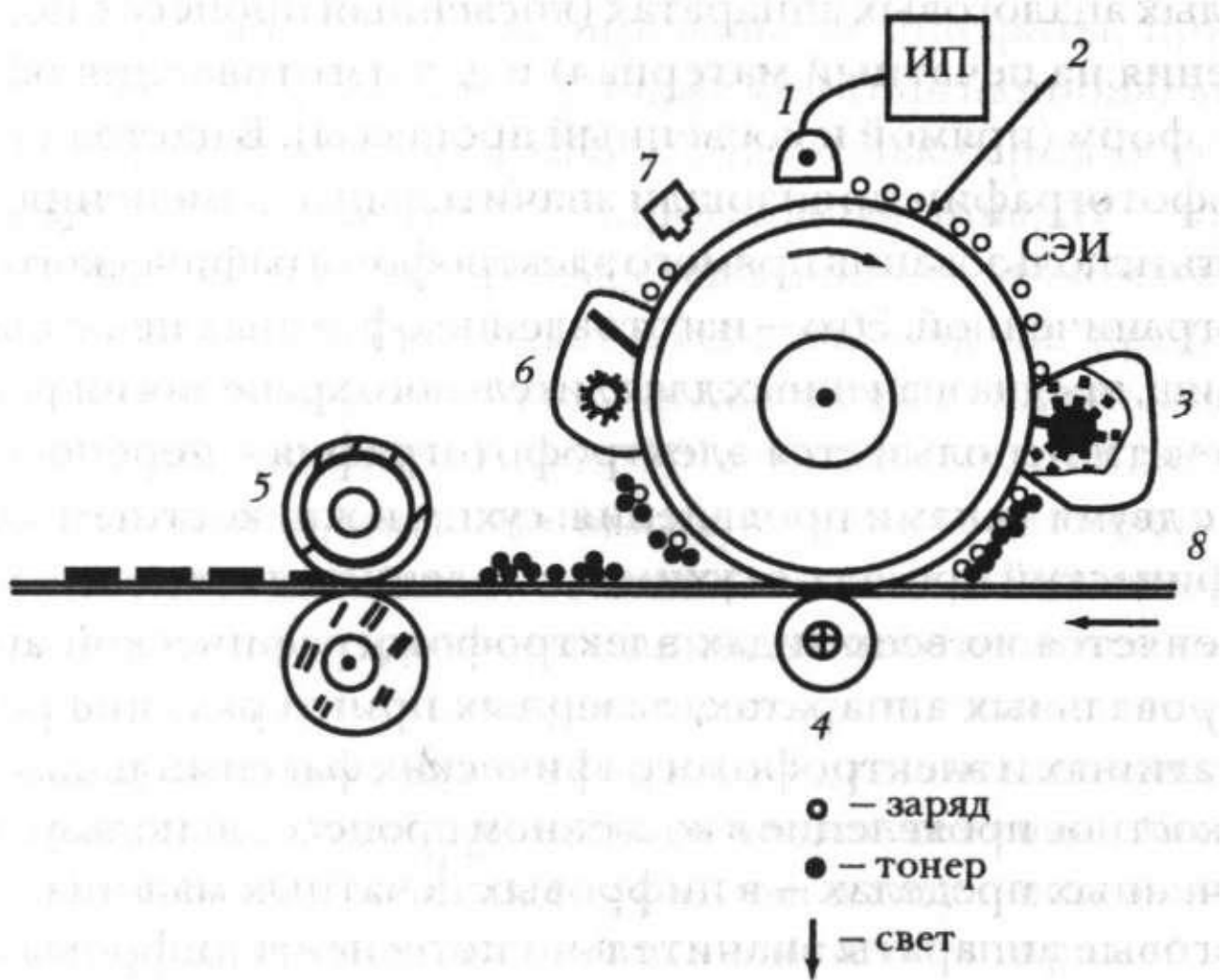


Рис.3.13. Схема електрофотографічного процесу:

1 - зарядка поверхні фоторецептори, 2 - запис зображення, 3 - проявлення, 4 - перенесення зображення, 5 - закріплення зображення, 6 - очищення фоторецептора, 7 - стирання заряду, 8 – папір.

3.5. Копіювальні матеріали для ксерографії та електрофаксу

За технологією отримання копій, фотопровідні шари для ксерографії належать до матеріалів багаторазово використання, а шари способу «електрофакс» (папери з цинкоксидним покриттям) - до матеріалів одноразової дії.

Ксерографічні матеріали отримують вакуумним напиленням на

електропровідну підкладку (алюмінієву фольгу, пластину або циліндр) шару аморфного селену завтовшки 20-100 мкм. Темновий опір фотопровідного шару зазвичай становить 10^{13} - 10^{16} Ом*см, але під час освітлення він знижується на 2-3 порядки. Для поліпшення експлуатаційних властивостей на поверхні підкладки перед напиленням селенового шару створюють оксидну плівку Al_2O_3 .

Окрім селенових шарів, використовують покриття зі сплавів цинку, кадмію, сірки, оксиду цинку, який диспергований у силіконовій смолі, гідратований кремній тощо.

Матеріали, що використовують для способу «електрофакс», складаються з паперової підкладки та фотопровідного шару - дисперсії оксиду цинку в електроізолюючому зв'язуючому матеріалі. Цей шар умішує електронно-акцепторні домішки та сенсibiliзуючі сполуки. Як зв'язуюче середовище застосовують термопластичні полімери (полівінілацетати, сополімери вінілхлориду тощо), а як підкладку - баритовані пергамінові та інші спеціальні види паперів масою не менше ніж 100 г/м².

Від ксерографії цей процес вирізняється відсутністю стадії перенесення проявленого зображення, оскільки воно безпосередньо закріплюється на цьому фотопровідному шарі. Для проявлення використовують як сухі порошкові, так і рідкі проявники (розчини барвників або пігментів у неполярних вуглеводнях).

3.6.1. Нетрадиційні електрофотографічні системи

3.6.1.1. Деформаційні системи

Електростатичні силові поля, що виникають на поверхні експонованої за шаблоном електрофотографічної пластини, деформують розм'якшений шар полімеру. Внаслідок цього на її поверхні виникає рельєфна структура (деформаційне зображення), форма якої суттєво залежить від шаблона, величини заряду та режимів процесу.

У процесі створення термопластичного зображення послідовно або паралельно відбуваються процеси: зарядження, експонування, короткотермінове нагрівання, яке призводить до його деформації, охолодження, що обумовлює фіксування зображення. Пластина складається зі скляної або поліетилентерафталатної підкладки, провідного шару (шару селену на склі, тонкого шару напиленого металу, провідного

полімерного шару тощо), фотопровідного та термопластичного деформувального шарів. Якщо фотопровідник термопластичний, то він може утворювати деформувальний шар.

Деформаційні системи мають такі переваги: сухе проявлення, короткий час реалізації всього процесу, легке стирання зображення та повернення системи до початкового стану, відносно висока щільність інформації.

3.6.1.2. Міграційні системи

Міграційний метод ґрунтується на переміщенні відповідно до рисунку шаблону дрібних фотоелектрично заряджених частинок фотопровідника в тонкий, тимчасово розм'якшений термопластичний полімерний шар. Фотопровідник є речовиною, що формує зображення. Матеріал, у якому створюється зображення, складається з підкладки, електропровідного та полімерного шарів, а також з тонкого шару зі щільно викладеними частинками фотопровідника (рис. 3.2, *а*). Фотопровідник може бути розміщений у полімері упорядковано (рис. 3.2, *б*) або хаотично (рис. 3.2, *в*).

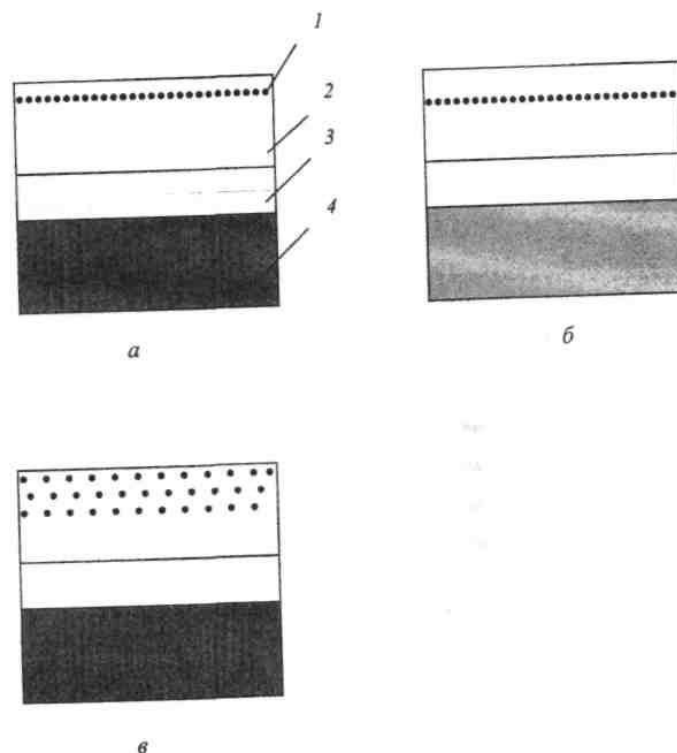


Рис 3 2 Міграційні матеріали з різною структурою шару:

1- фотопровідник; 2 – термопласти; 3 - прозорий електропровідний шар; 4 – підкладка.

Після заряджання та експонування утворюється приховане зображення у вигляді розподілу заряджених або незаряджених частинок, які стійкі в матриці високоомного полімеру. Міграційне зображення візуалізується зі зниженням в'язкості полімерного шару, що досягається підвищенням температури, або під дією парів розчинника. При цьому експоновані частинки переміщуються до підкладки. Таке селективне переміщення можна формувати так, щоб без додаткового оброблення спостерігати зображення, наприклад, за рахунок прямого розсіювання світла в зонах, у яких перемістились частинки; сильного поглинання світла в незмінних зонах шару, що створює позитивне зображення. Висококонтрастне зображення з'являється під час занурення проекспонованого матеріалу в розчинник, при цьому термопластичний шар з неекспонованими частинками вимивається, а всі експоновані частинки осаджуються на підкладку щільним шаром.

3.6.1.3. Фотоелектрофорентні системи

Фотопровідні частинки, дисперговані в інертній рідині, розміщуються між двома електродами та експонуються в електричному полі через шаблон. У результаті процесів заряджання та перезаряджання частинки переміщуються відповідно до рисунка шаблону і тим самим створюють зображення. Якщо частинки забарвлені, то отримане зображення теж буде забарвленим. Якщо до складу системи входять три види забарвлених частинок (синьо-зелені, жовті та пурпурні частинки), то можливе позитивне або негативне кольорове зображення. Проте ця технологія не набула широкого використання через складність технологічного процесу отримання копій.

3.6.1.4. Фотоелектролітичні системи

Створене у фотопровідниках приховане зображення може бути візуалізоване в результаті перебігу електрохімічних реакцій у спеціальних системах. Для цього застосовують фотопровідники з високим коефіцієнтом підсилення, тобто такі, кожний фотон яких створює в них велику кількість заряду, а також процеси перебігу в них певних електролітичних хімічних реакцій, які також забезпечують ефект підсилення. Така комбінована система може мати дуже високу чутливість. Шари світлочутливої системи, в якій відбуваються процеси електролізу, розміщують

у вигляді сендвичів. У них перебігають первинні електрохімічні реакції, такі як утворення металевих зародків для подальшого фізичного проявлення, ініціювання полімеризації, активації або дезактивації каталізаторів. Однак застосування таких систем не набуло широкого застосування через їх низьку роздільну здатність, малу швидкість функціонування та значні матеріальні видатки для отримання рівномірного зображення великого формату.

3.7. Фотографічні та експлуатаційні характеристики фотопровідних шарів

Фотографічні властивості фотопровідних шарів характеризуються такими параметрами: інтегральною світлочутливістю матеріалу, спектральною чутливістю та роздільною здатністю. Ці параметри можна визначити як за характеристиками (показниками) кінцевого продукту, так і за параметрами електростатичного прихованого зображення.

3.7.1. Інтегральна світлочутливість

В електрофотографії інтегральну світлочутливість визначають вимірюванням потенціалу прихованого зображення (залишкових зарядів на шарі після експонування) та оптичних густин проявленого зображення. У першому випадку як критерій світлочутливості використовують деякий залишковий заряд, а отримані величини світлочутливості відносять лише до фотопровідного шару. У другому випадку критерієм світлочутливості є деяка оптична густина, отримані величини якої стосуються всього електрофотографічного процесу.

Значення світлочутливості, визначені за прихованим зображенням використовують у дослідженнях та для розроблення фотопровідних шарів, їх значення знаходять за характеристичною кривою електростатичного зображення (рис. 3.3), що являє собою залежність відносної зміни поверхневого потенціалу фотопровідного шару від логарифма величини світлового потоку, який падав на шар. Критерієм світлочутливості слугує час, протягом якого (за стандартних умов експонування) зміна поверхневого потенціалу фотопровідного шару дорівнюватиме 0,5 одиниць.

Для копіювальних процесів значущою є якість візуалізованого зображення, зокрема оптична густина візуалізованого зображення на фотопровідному шарі.

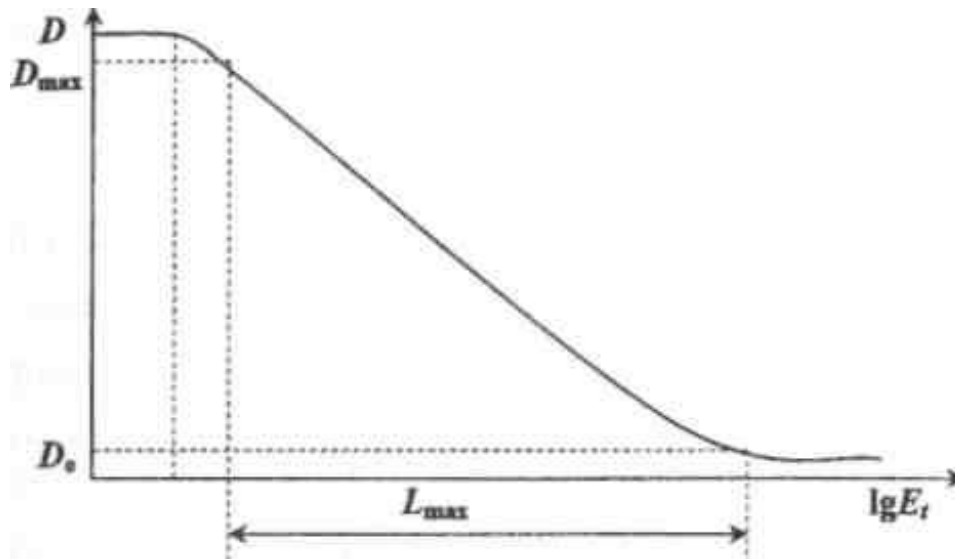


Рис. 3.3. Характеристична крива електрофотографічних шарів.

Для визначення основних характеристик електрофотографічних шарів будують характеристичну криву, яка на відміну від характеристичної кривої срібловмісних фотографічних матеріалів має обернений характер, тобто меншим експозиціям E , відповідають більші оптичні густини B . Це пояснюється тим, що чим менше освітлення отримав шар, тим менше було знято зарядів з нього, і тим більшими будуть оптичні густини відповідних ділянок шару після його проявлення.

За допомогою характеристичної кривої визначають: максимальну та мінімальну оптичні густини, світлочутливість, інтервал експозицій $I_{\text{макс}}$ та коефіцієнт контрастності зображення.

гідно з літературними джерелами найбільшу світлочутливість мають шари зі сплаву селену й телуру, яка майже дорівнює світлочутливості фототехнічних плівок і технічних фотопаперів.

3.7.2. Спектральна світлочутливість

Спектральна чутливість фотопровідних електрофотографічних шарів залежить головним чином від спектра поглинання фотопровідника та використовуваного сенсibilізатора. Так, оксид цинку чутливий лише у спектральному діапазоні 300-420 нм з максимумом в ультрафіолетовій зоні спектра, аморфний селен - у діапазоні 300-600 нм з максимумом 410-430 нм, сплав селену з телуrom у діапазоні 400-850 нм з максимумом 580-600 нм.

Спектральна чутливість селенового шару залежить не лише від наявності в

ньому домішок, але й від температури підкладки під час напилювання селену і температури витримування пластини після напилення.

Використання дво- і тришарових електрофотографічних матеріалів дає змогу розширити зону спектральної чутливості та підвищити світлочутливість електрофотографічних шарів.

3.7.3. Роздільна здатність

Роздільна здатність електрофотографічних шарів визначається багатьма властивостями фотопровідника, головна з яких - їх поверхнева електропровідність. Вона залежить також від способу візуалізації прихованого зображення. Роздільна здатність прихованого (непроявленого) електростатичного зображення перевищує 2000 мм^{-1} . Процес візуалізації зображення суттєво знижує цей показник. Також вона знижується у процесі перенесення зображення - тобто роздільна здатність залежить від властивостей підкладки. У разі електронного та електродинамічного зчитування роздільна здатність визначається розмірами електронної плями та зонда відповідно.

Роздільна здатність проявленого зображення залежить від способу проявлення та розміру частинок проявника. У разі каскадного проявлення або проявлення магнітним пензлем з використанням порошкового проявника з розмірами частинок 5-20 мкм роздільна здатність коливається у межах $15\text{—}40 \text{ мм}^{-1}$; для проявлення рідкими суспензіями або порошковою хмарою з використанням порошкового проявника з розміром частинок 0,5-5,0 мкм вона становить $80\text{--}200 \text{ мм}^{-1}$; для проявлення колоїдною суспензією з частинками розміром 0,1 мкм роздільна здатність коливається у межах $200\text{--}600 \text{ мм}^{-1}$ тощо.

3.7.4. Градаційні характеристики

Градаційні характеристики визначають за характером спаду потенціалу поверхні у результаті експонування, залежністю кількості осадженого тонера від потенціалу поверхні, а також за залежністю оптичної густини від кількості тонера на одиниці поверхні. Разом всі ці залежності суттєво впливають на градаційні характеристики та спотворюють тоновідтворення, роблячи тим самим неможливим відтворення тонових зображень без їх попереднього растрівання.

3.7.5. Крайовий ефект

Великий вплив на тоновідтворення у процесі проявлення та на контрастність

відбитка справляє конфігурація електричного поля, що індукується над поверхнею фотопровідника прихованим зображенням. Заряди, що концентруються над поверхнею фоторецептора після експонування, створюють електричне поле, силові лінії та напруги якої для різних відтворюваних об'єктів будуть різними. Так, у процесі відтворення тонких штрихів нерівномірність напруги електричного поля майже не впливає на якість проявленого зображення. Проте відтворення об'єктів з відносно великою шириною штрихів спостерігаються крайові ефекти, які полягають у тому, що краї цього об'єкта на відбитку мають більшу оптичну густину, ніж центральна його частина, через нерівномірність осадження тонера, що спричинено нерівномірністю поля прихованого електростатичного зображення.

3.8. Методи отримання тонових зображень електрофотографічними способами

Якість копій тонових зображень, одержаних способами електрофотографії, через дію крайового ефекту є незадовільною. Найефективніший захід щодо запобігання цьому ефекту - застосування проявникового електрода, який являє собою металеву пластину, розміщену паралельно ксерографічній пластині на незначній відстані від неї. При цьому для відтворення тонових зображень потрібно раструвати зображення, субтрактивним або адитивним способом. З використанням субтрактивного растрування світло від оригіналу через растр потрапляє на фотопровідний шар. Растр поглинає світло від оригіналу в кількостях, які пропорційні коефіцієнтам поглинання елементів растра. У разі застосування адитивного способу растр та оригінал експонують окремо на фото провідниковий шар, а ефект растрування залежить від сумарної експозиції. Для репродукування ілюстраційно-текстових оригіналів плівковий растр накладають лише на тонові ділянки оригіналу, що дозволяє репродукувати текстову частину оригіналу без погіршення якості та поліпшити якість відтворення тонового зображення.

3.9. Застосування електрофотографії

Головна сфера застосування електрофотографічних систем - репрографія. Окрім

використання її для помноження документації, електрофотографію застосовують для мікрофільмування, збільшення зображень, отримання друкарських форм, кольорового копіювання, а також у деяких процесах телекопіювання, рентгенографії тощо.

Сучасні копіювальні пристрої мають продуктивність від п'яти до 150 копій за хвилину. Ці пристрої можуть копіювати з різних за форматами оригіналів, розкладати копії по стосах і автоматично сортувати їх у спеціальному пристрої - колаторі. Пристрої для копіювання кольорового зображення працюють за принципом кольороподілу з використанням світлофільтрів, а кольорові копії створюються послідовним кольоруванням тонерами відповідного кольору або за один цикл.

Розвиток найбільш продуктивних пристроїв для виведення даних на периферійні електронні пристрої зумовлено потребою використовувати зростаючу потужність центральних пристроїв. Електрофотографічні пристрої найбільш прийнятні для виведення даних. Принцип роботи цих пристроїв такий: фотопровідниковий шар, нанесений на барабан, експонується модульованим випроміненням лазера і швидко проявляється сухим тонером за принципом магнітного пензля. Тонове зображення переноситься під тиском на папір та фіксується нагріванням під тиском.

Щоб створити рентгенівське зображення, використовують ксерорадіографію. На селенових пластинках завтовшки 100-800 мкм сухим проявленням створюють тональне зображення. Хоча чутливість ксерорадіографічного матеріалу менша, ніж срібловмісних фотоматеріалів, проте краще передавання деталей та більша контрастність зображення.

Електрофотографічні системи використовують для одно- та багатоколірних діапозитивів, голографічних зображень, для копіювання телевізійних та реєстрації осцилографічних зображень, тиражування рекламної продукції.

НЕ 1.4 Процеси з використанням діазосполук.

4.1. Загальні відомості

Діазографія об'єднує комплекс методів і засобів копіювання на основі використання діазосполук, чутливих до випромінювання в ультрафіолетовій зоні спектра.

Діазотипія - це процес, у якому використовуються світлочутливі діазонієві солі та створюється видиме зображення шляхом експонування світлочутливого шару і подальшої його темної обробки (перебіг реакції з утворенням барвника).

Діазосполуки — ароматичні сполуки із загальною формулою $R-N^+ \equiv NX$, де R — арильний радикал; діазогрупу $-N^+ \equiv N-$ X — кислотний залишок або гідроксигрупа (Cl-, NO₃—, OH- та ін.), наприклад, хлористий діазобензен $C_6H_5N \equiv NCl$. Діазосполуки отримують діазотуванням амінів (похідні аміаку, водень в яких заміщено вуглеводневими радикалами – 1,2,3). Діазосполуки використовують різноманітних органічних синтезів, для отримання азобарвників, лікарських речовин.

Перші кроки у створенні діазотипії були зроблені в 1858 р., коли Петер Грісс уперше синтезував ароматичні діазосполуки та продемонстрував можливість отримання азотобарвників. У 1881 р. Бертло та Віель виявили у діазосполуках світлочутливість і в 1885 р. Вест уперше продемонстрував можливість використання їх для отримання фотографічного зображення. Проте тільки в 1920 р. був розроблений технологічний процес виготовлення копії з використанням двокомпонентних світлочутливих матеріалів з аміачним проявленням. У 1923 р. фірма Калле випустила першу промислову партію діазопаперу.

У 60-90-х роках ХХ ст. особливо багато фірм випускали широкий асортимент світлочутливих матеріалів на основі діазосполук (здебільшого для копіювання технічної документації та отримання коректурних копій).

Технології створення зображення на діазоматеріалах:

- синтез барвника солями діазонію на неекспонованих ділянках (утворюється азотобарвник);
- фотоліз газоподібного азоту, який перебуває в полімерному шарі, з утворенням бульбашок;
- фотореакція діазосполук залежно від режимів експонування зі зміною їх розчинності чи адгезії, що призводить до створення рельєфного зображення.

4.2. Технологічна схема та варіанти діазографічного процесу

На практиці реалізуються три технологічні варіанти діазотипного процесу, відповідно до яких використовують одно-, дво- і трикомпонентні матеріали. Усі технологічні процеси відбуваються за схемою «позитив-позитив».

Двокомпонентні матеріали складаються з діазосполуки та азотосполуки, а також містять стабілізуючі домішки, які забезпечують неможливість передчасної реакції. Після експонування матеріал витримують у парах аміаку, який, проникаючи в шар, нейтралізує кислоту і одночасно проходять реакції сполук азоту з утворенням барвника в тих місцях, на які не діяло світло під час експонування матеріалу.

Трикомпонентні діазоматеріали містять, окрім діазо- та азотокомпонентів, ще й сполуки, які під час нагрівання виділяють лужні речовини. Проявлення відбувається у процесі нагрівання проекспонованого матеріалу.

Однокомпонентні матеріали містять лише діазосполуки. Проявляються вони в разі нанесення на їх поверхню лужного розчину азотосполуки.

Процес експонування виконують за допомогою освітлювачів, що мають випромінювання у спектральному діапазоні 365-420 нм (УФ-випромінювання). Процес експонування відбувається неперервним протягуванням оригіналу в контакт з діазоматеріалом навколо прозорого барабана з освітлювачами всередині.

Після експонування виконується процес проявлення (сухий - у парах аміаку чи нагріванням; вологий - у лужних розчинах). Секції експонування та проявлення можуть бути як розділені, так і об'єднані.

Найбільшого застосування набули двокомпонентні діазоматеріали, оскільки вони містять усі речовини, потрібні для отримання копії, і не потребують використання рідких проявників. Процес проявлення відбувається у парах аміаку, тому приміщення мають бути обладнані досить потужною витяжною вентиляцією.

Трикомпонентні діазоматеріали, що проявляються нагріванням, уперше були розроблені наприкінці 50-х років ХХ ст. Процес проявлення проекспонованого матеріалу виконується шляхом протягування його між гарячими валиками. Існує дві групи таких матеріалів.

Перша група - це матеріали, що містять у світлочутливому шарі такі компоненти: діазосполуки, азотосполуки, кислоту (що знижує швидкість реакції), речовину, яка розкладається під час нагрівання з виділенням аміаку, основну, яка зумовлює підвищення рівня рН шару до значення, за якого відбувається реакція азотосполуки.

Друга група - це матеріали, що містять у світлочутливому шарі діазосполуки, азотосполуки, основну речовину, яка зумовлює підвищення рівня рН шару до значення, за якого відбувається реакція азотосполучення. У цих матеріалах реакція азотосполучення попереджається окремим диспергуванням основних компонентів у легкоплавкому полімерному зв'язуючому середовищі, нанесеному на підкладку. Під час нагрівання зв'язуюче середовище плавиться, а основні компоненти вступають у хімічну реакцію з утворенням барвника.

До речовин, що під дією температури розкладаються з виділенням аміаку або летких амінів, відноситься сечовину, тіосечовину, її похідні та ін.

Трикомпонентні діазоматеріали проявляються за температури 90-160 °С протягом декількох секунд. Проте такі копії не довговічні і мають зайвий фон, що погіршує їх якість.

У випадку однокомпонентних діазоматеріалів можна отримати копії з різним колірним тоном та контрастністю, використовуючи різні азотосполуки.

4.3. Фотографічні та експлуатаційні характеристики діазотипних матеріалів

Основні експлуатаційні характеристики діазоматеріалів - це інтегральна та спектральна світлочутливості, контрастність, фотографічна широта, структурні характеристики (роздільна здатність).

Інтегральна світлочутливість діазоматеріалів приблизно в мільйон разів нижча, ніж галогеносрібних матеріалів. Це пояснюється тим, що на діазошарах безпосередньо виходить видиме зображення, у той час, як на галогеносрібних матеріалах - приховане зображення, яке посилюється у процесі фотографічного проявлення. Окрім того, діазоматеріали поглинають випромінювання лише в дуже вузькій зоні спектра. Для розширення спектральної чутливості діазошарів та ефективнішого використання променевої енергії випромінювання наświetлювачів до складу діазошарів вводять речовини, які поглинають випромінювання в ультрафіолетовій та синьо-фіолетовій зонах спектра.

Контрастність діазошарів велика, а фотографічна широта мала, тому отримати на таких матеріалах півтонові зображення майже неможливо. Коефіцієнт контрастності мало залежить від умов проявлення, оскільки у світлочутливому шарі є надлишок азотосполуки і барвник утворюється з усієї маси діазосполуки, що залишилася після експонування.

Роздільна здатність діазоматеріалів залежить від властивості підкладки. Якщо як підкладку використовують плівковий матеріал роздільна здатність може сягати $1200-1500 \text{ мм}^{-1}$. Роздільна здатність діазоматеріалів на паперовій основі становить $10-15 \text{ мм}^{-1}$. Висока роздільна здатність діазоплівки пояснюється тим, що діазошар має молекулярно-дисперсну (або колоїдально-дисперсну) структуру.

Фотографічними й експлуатаційними характеристиками діазотипних шарів слід вважати також і колір отриманого зображення, який залежить від

хімічного складу та будови азотосполуки. Використовуючи різні азотосполуки можна отримати різноманітні за кольором копії.

4.4. Застосування діазоматеріалів

Виходячи з основних характеристик діазоматеріалів, можна визначити їх галузь застосування. Ці матеріали не можна використовувати для безпосереднього фотографування, проте їх широко застосовують у копіювальних процесах.

Основні переваги діазоматеріалів:

- низька вартість продукції (вартість однієї копії у шість разів менша за аналогічну, виконану на галогеносрібних матеріалах);
- сухе проявлення (окрім однокомпонентних діазоматеріалів);
- швидкість виготовлення копії;
- створення позитивного зображення;
- висока якість відтворення штрихових зображень;
- можливість виготовлення дуже зменшених зображень без втрати деталей;
- незмінність розмірів матеріалу під час виготовлення копій.

Основні технологічні процеси з використанням діазоматеріалів:

- розмноження та зберігання технічної документації (збережуваність зображення на діазоплівках не менше 50 років, на діазопаперах - не менше 30 років);
- копіювання документації;
- мікрофільмування;
- друкування діапозитивів та навчальних фільмів;
- репродукційні процеси поліграфії;

- виготовлення коригувальних копій у фоторепродукційних процесах поліграфії;
- копіювання конструкторської документації.

Собівартість однієї копії формату А4, виготовленої способом діазографії, у 25 разів нижча від собівартості копії, виготовленої способом проєкційного фотокопіювання, у 17 разів нижча від копії, виготовленої способом контактного фотокопіювання, у 11 разів нижча від виготовленої термографічним способом та у п'ять разів нижча від собівартості копії, одержаної електрофотографічним способом копіювання.

Особливості діазографії:

- використання оригіналу лише на прозорій підкладці;
- для проявлення використовують речовини із сильним запахом;
- оригінали, що виконані синім або фіолетовим кольором, не відтворюються;
- через низьку світлочутливість діазоматеріалів вони придатні лише для контактного копіювання, що унеможлиблює масштабування зображення;
- після виготовлення копій їх потрібно додатково обрізувати, обкантовувати та фальцювати.

4.5. Матеріали для діазографії

За видом підкладки діазоматеріали поділяють на діазопапір, діазокальку, діазоплівку та металодіазонієві матеріали. За кольором їх поділяють на коричневі, чорні, сині, фіолетові, червоні та жовті. Кожний колір має своє визначене призначення. Так, діазоматеріали, які дозволяють отримувати зображення жовтого та коричневого кольорів, використовують для отримання діазодублікатів, оскільки ці кольори більш світлонепроникні для ультрафіолетового випромінювання, ніж інші.

Діазоматеріали всіх типів випускають або в рулонах різної ширини, або у пачках різних форматів.

4.5.1. Діазопапір

Це традиційний діазоматеріал, який найчастіше застосовують у процесах діазографії. Уперше діазопапір було виготовлено в Німеччині у 1923р.

Діазопапір буває трьох типів: 1) тришаровий, який має адсорбуючий, протискручувальний та світлочутливий шари; 2) одношаровий, який складається лише зі світлочутливого шару; 3) двошаровий зі світлочутливим шаром, що покритий поліетиленом. Здебільшого діазопапір випускають у рулонах, причому папір першого типу має бути намотаний світлочутливим шаром назовні, два інші - світлочутливим шаром усередину. Ширина рулону діазопаперів - 640, 764, 841 та 874 мм, довжина - 20- 100 м.

Основні параметри діазопаперів сухого проявлення (залежно від типу) коливаються у межах: швидкість копіювання - 1,2-4,0 м/хв; роздільна здатність - 3,1-12,0 лін./мм; білизна фону - 63-80 %; оптична густина зображення - 0,6-1,2 од.; гарантійний термін зберігання - 3-9 років.

На якість копій на діазопаперах і термін їх зберігання впливає багато чинників, насамперед температура зберігання та вологість повітря.

4.5.2. Діазокалька

Діазокалька - це різновид діазопаперу, що являє собою прозору основу, на яку нанесено світлочутливий шар. Її призначення - отримання копій з контрастних штрихових оригіналів, виконаних на паперовій кальці або на іншій світлопроникній основі, а також з діазодублікатів, придатних для подальшого світлокопіювання сухим способом на діазопапір та для довготривалого зберігання в архівах. Як основу для нанесення світлочутливих діазошарів використовують спеціально підготовану світлопроникну тканину (бавовняну та целюлозну). Основні характеристики діазокальок: роздільна здатність - 3,3-5,3 лін./мм; швидкість копіювання - 0,9-1,2 м/хв; світлопроникність фону - 20 %; гарантійний термін зберігання - 4 роки.

Діазокальку випускають у рулонах завдовжки 20-100 м та завширшки 307-878 мм, а також у аркушах форматами від 220х307 до 430х604 мм.

4.5.3. Діазоплівка

Діазоплівка відрізняється від діазопаперу та діазокальки високою прозорістю та роздільною здатністю, що значно розширює спектр оригіналів і дублікатів, які можна копіювати, а також одержувати копії кращої якості. Діазоплівки можна використовувати для отримання копій як зі штрихових, так і з півтонових оригіналів, підготовлення та помноження креслярсько-конструкторських документів, у мікрографії для виготовлення діазодублікатів мікрофільмів. Діазоплівки використовують, окрім репрографічних процесів, для виготовлення проміжних фотоформ у поліграфії.

4.5.4. Металодіазонійові матеріали

Як світлочутливі компоненти цих матеріалів застосовують розчини діазосполук та азотнокислого срібла. Під час експонування такого матеріалу через негатив на освітлених ділянках утворюється зображення з відновленого срібла. Для видалення не розкладених діазосполук та азотнокислого срібла це зображення фіксують (промивають у воді), подальшого оброблення воно не потребує.

Металодіазонійові матеріали порівняно з іншими діазоматеріалами більше використовують, оскільки вони мають такі переваги:

- високу роздільну здатність (110-120 лін./мм), зумовлену дисперсійним характером суміші, внаслідок чого під час її експонування не спостерігається розсіювання світла;
- високу світлочутливість (у 3-25 разів більшу від світлочутливості інших діазоматеріалів, проте вона менша порівняно з галогеносрібними матеріалами);
- можливість регулювання їх контрастності за допомогою зовнішніх впливів, передусім через змінювання вмісту вологи в шарі (зі зменшенням вологи у світлочутливому шарі його контрастність збільшується). У виробництві

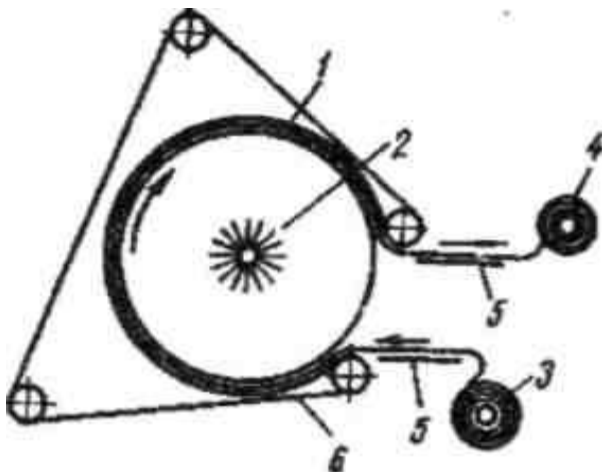
контрастність регулюють змінюванням інтенсивності освітлення (контрастність буде більшою у разі короткотермінового інтенсивного освітлення, аніж під час довготривалого, але неінтенсивного). Проте ці матеріали не позбавлені й недоліків (зокрема, низький термін їх зберігання, вони не мають відповідної основи).

Ці матеріали частіше застосовують для виготовлення мікрокопій з великою кратністю зменшення.

4.5.5. Діазоматеріали на основі водовимивних композицій

Ці матеріали розроблені й використовуються для виготовлення проміжних фотошаблонів для радіоелектронних систем. Діазосполуки у їх зв'язуючому - водорозчинному полімері - наносять на прозоре до УФ-променів скло. Після експонування та проявлення зображення фіксують вимиванням водним розчином (з проміжних ділянок) непроекспонованої композиції з подальшим температурним закріпленням зображення. У результаті отримують проміжний фотошаблон на прозорій основі з високою роздільною здатністю та оптичною густиною, який має добру водостійкість та необхідні фізико-хімічні властивості для подальшого дублювання.

4.6.1. Обладнання для діазографії



Основні елементи світлокопіювального апарата: 1 - циліндричне скло; 2 - джерело УФ-випромінення; 3 - рулонний діазоматеріал; 4 - рулон матеріалу із копіями; 5 - транспортер; 6 - оригінал

Апарат працює таким чином: на діазоматеріал (рулон) накладається оригінал, який виготовлено на прозорій або півпрозорій основі, і за допомогою транспортера обертають його навколо циліндричного скла системи експонування (операція експонування). Після експонування діазоматеріал надходить для проявлення у спеціальну камеру,

після чого змотується в рулон. Оригінал повертається до оператора. Світлокопіювальні апарати такого типу використовують два способи проявлення зображення: сухий (у парах аміаку); мокрий (у водяному розчині азотокомпонентів та лугу).

Основні операції технологічного процесу діазокопіювання: підготовчі, експонування, проявлення, заключні, оздоблювальні.

Підготовчі операції - це підготовка проявного пристрою апарата; увімкнення всіх робочих пристроїв; установлення рулону діазоматеріалу в апарат; підбирання оригіналів за характером зображень, світлопроникності основи та формату; перевірка кількості оригіналів, що підлягають копіюванню; обкантивання (зміцнення країв оригіналу за допомогою липкої стрічки); закріплення оригіналів (закріплення зображень на оригіналі нанесенням на його поверхню розчину полівінілбутиролю або карбомідного лаку); визначення швидкості паперопровідного пристрою, яка залежить від виду оригіналів, світлочутливості діазоматеріалу, освітленості тощо.

Заклучні операції: вимкнення освітлювача, пристрою для подавання аміаку та електронагрівників; перехід роботи апарата на холостий хід для охолодження освітлювача; відключення апарата.

Оздоблювальні операції: розрізування копій у рулоні на аркуші, обкантивання, фальцювання та комплектування копій.

4.8. Технологічні процеси з використанням інших діазосполук

4.8.1. Процеси фізичного проявлення прихованого зображення

Діазосполуки застосовують також у деяких специфічних процесах з утворенням та подальшим фізичним проявленням прихованого фотографічного зображення, яке складається з мікроскопічних частинок металу (наприклад, срібла або ртуті). Найбільш відомі металодіазонієвий процес та процеси з використанням діазосульфанолю та діазосульфідів. Ці процеси забезпечують надзвичайно високу роздільну здатність (до 2100 мм^{-1}) та чіткість країв штрихів. Такі показники дозволяють друкувати мікрокадри з 400-кратним зменшенням. Так, одна сторінка аркуша формату А4 займає на мікрокадрі площу $0,1 \text{ мм}^2$, а

текст з 255 сторінок розміщується на плівці розміром 8x8 мм. Тому ці матеріали використовують для мікро-фільмування з великою кратністю зменшення, виготовлення прецизійних фотошаблонів, високочастотних шкал та сіток. Таку високу роздільну здатність зумовлено гомогенністю шару. Проте такі плівки не набули широкого застосування через низьку збережувальність матеріалів (шари належить готувати безпосередньо перед застосуванням).

Металодіазонієвий процес. Металодіазонієві фотографічні матеріали містять у світлочутливому шарі діазонієву сіль та сіль металу, яка може легко відновлюватись до металевого стану. Сутність процесу полягає у тому, що під дією випромінювання діазонієві солі (наприклад, парадіазодиметил- або парадіазодиетиланілін) розкладаються з утворенням діалкілопара-амінофенолів, що мають сильну проявну здатність, більшу ніж металу. Проявна речовина відновлює метал з його солі. Таким чином, за достатнього опромінення і достатньої кількості в шарі діазонієвої солі та солі металу можна отримати видиме зображення без додаткової обробки. Цей процес можна обмежити також стадією утворення прихованого зображення з подальшим фізичним проявленням зображення.

Процеси на шарах з діазосульфанами та діазосульфідами. Діазосульфани та діазосульфідиди - малоактивні сполуки, проте деякі з них під дією УФ-випромінювання можуть переходити в активну форму. Після експонування в шарі створюється приховане зображення, що складається із зародків срібла або ртуті, яке візуалізується фізичним проявленням.

Процеси на шарах, які містять діазосполуки, дають змогу створювати копії у вигляді вимивного або гідрофільно-гідрофобного рельєфу і отримувати друкарські форми оперативної поліграфії, а також форм безрастового офсету.

4.8.2. Процеси з використанням фотохромних та інших світлочутливих органічних сполук

Процеси копіювання на фотохромні матеріали. Отримання зображень на фотохромних шарах використовують явище фотохромізму, сутність якого полягає в тому, що під дією випромінювання фотохромна речовина миттєво змінює

колір без будь-якого додаткового оброблення. Після закінчення опромінення забарвлення зникає (з більшою або меншою швидкістю). Фотохромізм - частковий випадок фототропії - оборотна зміна спектра поглинання речовини під дією електромагнітного випромінювання. Якщо спектр поглинання змінюється у видимій його зоні, тобто змінюється колір речовини, цей процес називають фотохромізмом.

Фотохромні властивості мають багато органічних сполук, серед яких найбільш відомі спіропирани. Ці безколірні сполуки під дією УФ-випромінювання змінюють свій колір.

Для реєстрації зображень використовують плівкові матеріали з полімерним шаром, у якому диспергована фотохромна речовина. Основні переваги: висока швидкість утворення зображення (менше 1 с); не використовуються процеси хіміко-фотографічного оброблення; висока роздільна здатність (до 2000 мм⁻¹); можливість багаторазового використання фотохромного матеріалу (кількість циклів «записування - стирання» без суттєвої зміни фотографічних характеристик для різних матеріалів коливається від 10 до 50 000 циклів). Такі матеріали можна застосовувати для спеціальних видів записування інформації - в системах пам'яті ЕОМ; в системах оптичного оброблення сигналів; у голографії під дією лазерного випромінювання тощо.

У репрографії їх використовують для виготовлення мікрофіш та супермікрокарт. Процес створення мікрозображень має три або чотири етапи. Тристадійний процес: отримання мікрокадру з десятикратним зменшенням на галогеносрібній плівці типу Мікрат; проєкційне копіювання мікрокадру на фотохромну плівку зі зменшенням 15-20 крат; уміщення отриманої мікрокопії між двома захисними плівками для запобігання дії навколишнього середовища. Останню операцію можна замінити хімічною дезактивацією копії, у результаті якої матеріал стає нечутливим до дії світла і температури.

Чотирістадійний процес використовують у разі потреби внесення змін до копії. Таке коригування виконують після другої стадії. Для цього кадр, що вміщує інформацію з помилками, стирають експонуванням відповідної ділянки

плівки жовтим світлом і повторно експонують кадр. Відкоригований мікрофільм на фотохромній плівці контактно копіюють на фотохромний матеріал і повністю фіксують зображення.

Основні переваги фотохромного процесу: швидкість виготовлення копії, висока роздільна здатність, добре передавання градацій, можливість коригування зображення.

Процеси копіювання на матеріали з фотоініційованим утворенням барвника. Фотоініційовані способи отримання зображень ґрунтуються на використанні середовищ, що містять речовини, які у фотозбудженому стані стають донорами вільних радикалів і в результаті вторинного процесу взаємодії радикалів з іншими компонентами можуть виникати: окиснення лейкосполук барвників; розпадання радикалів та взаємодія продуктів нерадикального характеру з іншими компонентами середовища; реакція радикала з реагентом середовища, у результаті чого реагент сам переходить у радикальний стан з утворенням барвника; ланцюгова реакція полімеризації. Серед них практичного застосування набули лише процеси на фотополімеризаційних матеріалах та спосіб копіювання з окисненням лейкосполук барвника.

4. Діазографія. Фотокопіювання.

(Фотолітографія)

Діазографія об'єднує комплекс методів і засобів копіювання на основі використання світлочутливих властивостей діазосполук (сполук на основі двоокису азоту).

В діазографічних способах копіювання, які ще називають діазотипними, діазокопіювальними чи світлокопіювальними, використовують спеціальні світлочутливі діазосполуки.

На отриманій копії світлим ділянкам оригіналу відповідають світлі ділянки копії і навпаки, тобто у разі копіювання позитивного оригіналу і копію отримують позитивну, а при копіюванні негативного оригіналу — негативну.

Діазоматеріали опрацьовують в незатемнених приміщеннях. Процес копіювання протікає дуже швидко. Швидкість переміщення паперу чи плівки сягає кількох метрів за хвилину.

Більшість діазопаперу і діазоплівки характеризуються досить низькою чутливістю і тому діазоматеріали застосовують в основному для контактного копіювання.

Для виготовлення контактних копій на діазоматеріалах застосовуються діазографічні апарати різних конструкцій. Це світлокопіювальні апарати і діазодублікати. Проекційний спосіб копіювання на діазоматеріали застосовується у спеціальних фотозбільшувальних чи читально-копіювальних апаратах.

Застосовують такі світлокопіювальні апарати:

- світлокопіювальні настільні сухого способу проявлення;
- світлокопіювальні настільні вологого способу проявлення;
- світлокопіювальні проекційні;
- апарати для опрацювання світлокопій.

Діазоматеріали поділяються за матеріалом основ і оптичної щільності діазошару на дві групи:

- діазопапір для виготовлення робочих копій (на паперовій основі різної щільності),
- діазокальки і діазоплівки для виготовлення дублікатів і проміжних оригіналів (на світлопроникаючій паперовій та плівочній основі).

Діазопапір випускається одно- і двокомпонентний різних кольорів. До контрастності і різкості ставляться підвищені вимоги. Діазокальки і діазоплівки призначені для внесення змін у креслення і виготовлення з них діазокопій.

Діазопапір призначений для виготовлення копій на світлокопіювальних апаратах із сухим ам'ячним проявленням (головним чином великоформатних креслень). Він випускається в рулонах і аркушах з одностороннім покриттям світлочутливим шаром, листовий папір може мати світлочутливий шар із двох боків.

Діазоплівка являє собою ацетилцелюлозну плівку, матову з одного боку. Вона призначена в основному для виготовлення дублікатів прозорих оригіналів. Дублікати використовують для багаторазового копіювання замість оригіналів, що підлягають тривалому зберіганню в архівах. Діазоплівка має таку ж чутливість, як і звичайний діазопапір. Її використання дозволяє здійснювати корекцію зображення на дублікаті тушшю чи олівцем до і після копіювання, замінювати фототехнічну плівку. Крім того, ця плівка може бути використана в фотонабиральних машинах.

НЕ 1.5 Способи копіювання на теплочутливі матеріали.

5.1. Загальні відомості

В приймальному шарі утворення зображення відбуваються під дією теплової енергії.

Способи копіювання на теплочутливі матеріали застосовують для копіювання креслень, штрихової та текстової документації.

Загальна схема отримання копії з використанням термочутливих матеріалів полягає в нагріванні темних ділянок оригіналу та подальшій взаємодії оригіналу і приймального шару. За деякої порогової температури в термочутливому шарі відбуваються зміни, які спричиняють появу видимого зображення.

Термографічні способи копіювання можна умовно поділити на дві групи: термохімічні та термофізичні. У першому випадку видиме зображення у шарі виникає в результаті хімічних процесів, які перебігають під дією тепла. Термофізичний спосіб полягає у поглинанні шаром теплової енергії, що призводить до зміни різних фізичних характеристик шару: прозорості(прозорий стає непрозорим або навпаки), електропровідності, розчинності шару та інше.

За способами копіювання термографічні способи поділяють на прямі та непрямі. Класифікацію процесів термографічних процесів наведено в табл. 5.1.

До прямого способу копіювання належать процеси, за яких копіювання виконують безпосередньо на термочутливий матеріал (способи «термофакс» (США) та «термоопір» (СРСР)). За непрямого способу копіювання термочутливий матеріал виконує роль проміжної ланки, а кінцеву копію отримують на папері.

Таблиця 5.1

Класифікація термографічних процесів

Процес	Механізм утворення прихованого зображення	Вигляд кінцевого зображення	Сфера застосування
Термофакс (прямий спосіб)	Термохімічне утворення світлопоглинальної сполуки	Світлопоглинальне	Копіювання та розмноження документації
Непрямий термографічний спосіб	Те саме	Те саме	Копіювання та розмноження документації. Процес призначено для довгострокового зберігання
Процеси на теплочутливих полімерах	Зміна оптичних властивостей під дією нагрівання	Світлопоглинальне або світлорозсіювальне	Отримання проміжних копій для проєкційного копіювання
Фототермографія	Одночасна дія світла і тепла, що викликає утворення зображення	Те саме	Те саме
	Активация (або дезактивация) актинічним випромінюванням чутливості до теплової енергії	—“—	—“—
Особливі термографічні процеси: адгерографія	Селективна дистиляція мінеральних мастил	—“—	—“—
електротермографія	Збільшення електропровідності під дією тепла	—“—	—“—

Термокопіювальний процес може відбуватися під дією:

- тільки теплової енергії - ІЧ-випромінювання, енергії лазерного випромінювання, високочастотного струму, теплового випромінювання від вибірково нагрітої поверхні тощо (термографія);
- теплової енергії та світлового випромінювання (фототермографія).

5.2. Технологічні схеми процесів термографії

Первинна стадія будь-якого термографічного способу полягає у контактному копіюванні оригіналу на теплочутливий шар.

Існує дві основні схеми контактного копіювання - з використанням теплопрозорого оригіналу або теплопрозорого копіювального матеріалу. У результаті копіювання утворюється дзеркально обернене зображення оригіналу. Тому копії зчитують через підкладку на відбивання (папір) або на просвіт (плівка). Копіювання зазвичай виконують через прозорий теплочутливий матеріал (рис. 5.1,6). Можна також одержати і пряме зображення. Для цього як оригінал використовують нагріту металеву друкарську форму високого друку або кліше із дзеркальним зображенням.

Початок розвитку цієї технології було покладено в 1950 р. патентом Міллера, на підставі якого в 1952 р. було створено технологічний процес, що отримав назву «термофакс». Пізніше в СРСР розробили аналогічний процес «термокопір». Це прямі способи отримання термографічних копій.

Сутність цих процесів полягає в такому. Тонкий прозорий папір вкритий майже безколірним воскоподібним шаром, який під дією підвищеної температури змінює свій колір до майже чорного. Копіювання виконується протягуванням оригіналу разом із папером навколо прозорого барабана, всередині якого містяться розжарені електроспіралі. У результаті одержують позитивне дзеркальне зображення, яке можна побачити через підкладку. Копії - сухі, придатні до подальшого використання.

Швидкість копіювання - 7-15 копій за хвилину, якість копій достатня для копій ділової документації - листування, ділових паперів, нескладних креслень без дрібних деталей.

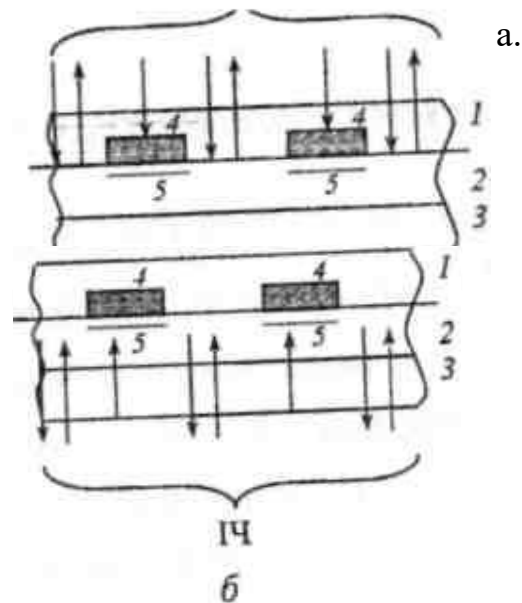


Рис. 5.1. Схеми контактного копіювання на термочутливий матеріал:
 а - копіювання через оригінал; б - копіювання через термочутливий шар; 1 - оригінал;
 2 - термочутливий шар; 3 - підкладка термочутливого матеріалу; 4 - темні ділянки
 оригіналу; 5 - зображення на термочутливому матеріалі

Проте цей спосіб має суттєві вади:

- не придатний для отримання копій з оригіналів, які мають дрібний текст і деталі, через низьку роздільну здатність матеріалів;
- копія поступово темніє, тому використання таких матеріалів для тиражування оригіналів, призначених для тривалого зберігання, неприпустиме (неможливе);
- внесені зміни до оригіналу тушшю, чорнилами, кольоровим олівцем відбивають ІЧ-промені, тому вони не нагріваються і не відтворюються на копії.

Ще одним із непрямих способів є спосіб перенесення зображення з використанням матеріалів з плавким покриттям (наприклад, термочутливий аркуш, одна сторона якого контактує з оригіналом, інша - з нетермочутливим приймальним аркушем). Схематично процес зображено на рис. 5.2.

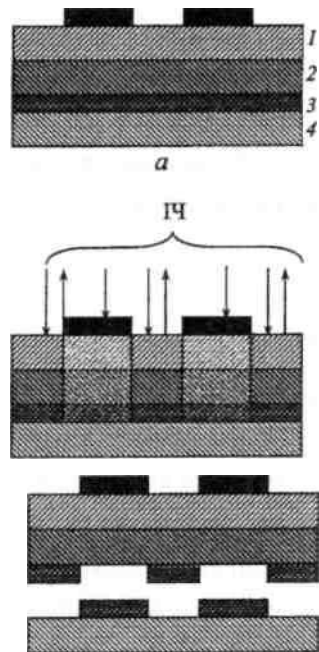


Рис. 5.2. Схема непрямого термографічного процесу:

a - тришаровий комплект: 1 - оригінал із зображенням;

2 - аркуш для перенесення; 3 - термочутливий шаром;

4 - приймальний аркуш; *б* - процес експонування;

в - роз'єднання аркушів після процесу перенесення зображення

Отриманий тришаровий комплект експонують ІЧ-випромінюванням, елементи зображення оригіналу при цьому нагріваються, а отже, нагрівають і відповідні ділянки проміжного теплочутливого аркуша. Як результат плавке покриття проміжного аркуша розм'якшується і переходить на приймальний матеріал.

Плавкі покриття виготовляють із застосуванням сумішей воску, парафіну, інших жирних кислот та їх похідних, у які додають мінеральні масла або інші пластифікатори. Для надання потрібного кольору у плавкий шар вводять пігменти (газову сажу, індиго тощо) або барвники (метилвіолет). Щоб мати різке зображення, комплект після експонування пропускають через систему подвійних роликів або прикладають тиск іншими способами. Забарвлений плавкий матеріал можна наносити безпосередньо на оригінал, тоді проміжний аркуш не потрібен. Цей спосіб застосовують для тиражування оригіналів, які не потребують довготривалому зберігання.

5.3. Фототермографія

До способів фототермографії належить двостадійний спосіб, розроблений фірмою 3M-Co під назвою Dual Spectrum (DS). Для цього способу

використовують два матеріали - світлочутливий проміжний шар, що містить активну речовину, яка може під дією тепла в хімічній реакції створювати потемніння, але під дією світла розкладається, та приймальний шар, у якому створюється кінцеве зображення. На першій стадії оригінал рефлексно (на відбивання) копіюють видимим світлом на проміжний світлочутливий шар. На цій стадії активна речовина розкладається на ділянках шару, яким відповідають світлі ділянки на оригіналі, та утворюється матриця, яка містить активну речовину на ділянках, яким відповідають темні ділянки на оригіналі. На другій стадії матриця складається з термореактивним папером і нагрівається. Приймальний шар паперу реагує з активною речовиною матриці, у результаті чого на папері виникає почорніння в місцях, що відповідають темним місцям на оригіналі.

Спосіб DS та інші фототермографічні способи мають такі переваги порівняно з прямими способами термографії: матеріал із зображенням немає залишкової термочутливості; можна відтворювати всі деталі (і ті, які відбивають ІЧ-промені); більша роздільна здатність та більш чітке зображення. Недоліки - двостадійний процес створення копій.

Найбільш перспективні копіювальні шари для цього способу містять зазвичай йодиди свинцю. Створення зображень ґрунтується на властивостях йодидів свинцю під дією світла збільшувати електропровідність і теплопровідність. Дія світла при цьому ініціює фотолітичну реакцію, яка зумовлює відновлення металу та утворення металевого зображення. Проте прийнятна швидкість реакції можлива лише в разі нагрівання шару до температури 100-150 °С. Для зображення матеріал експонують під оригіналом з боку копіювального шару світлом спектральної зони 350-550 нм протягом 30-60 с лампою 600 Вт та на відстані від освітлювача до шару 20 см з одночасним контактом підкладки з поверхнею, що нагріта до 100-150 °С. Така температура активує відновник, у результаті чого створюється негативне зображення з відновленого металу. Потім це зображення стабілізують за допомогою комплексотвірних речовин. У результаті отримують високоякісне зображення з роздільною здатністю 200 мм⁻¹, яке придатне до довготермінового зберігання.

Існують інші способи та матеріали для фототермографії, наприклад, створення

зображень на термочутливих паперах з покриттям з дисперсії чотирибромистого вуглеводню у N-вінілкарбазолі. Цей спосіб має п'ять операцій: попереднє нагрівання; реєструвальне вибіркоче експонування; друге експонування (для підсилення прихованого зображення); термічне проявлення; фіксування зображення. Після попереднього нагрівання матеріалу до температури розм'якшення N-вінілкарбазолу відбувається очутливлення шару та зниження зростання вуалі, яка утворюється у процесі реєструвального експонування. Реєструвальне експонування виконують за допомогою освітлювачів, які випромінюють світло в зоні 400 нм (ксенонова лампа). Після цього зображення підсилюють рівномірним експонуванням світлом у зоні спектра 580-600 нм (червона зона), У результаті чого квантова ефективність реєструвального експонування підвищується у 100-200 разів. Підсилене зображення проявляють нагріванням матеріалу протягом 5-30 с за температури 60-100 °С до утворення інтенсивно забарвленого зображення. Фіксування виконується опроміненням шару світлом у видимій зоні спектра, унаслідок чого матеріал дезактивується та втрачає чутливість до нагрівання. Цей процес дозволяє отримувати копії не тільки зі штрихового оригіналу, але й із електронно-променевої трубки.

5.4. Копіювальні матеріали для термографії

Процеси термографії поділяють на прямі та непрямі, термохімічні та термофізичні. Термографічні матеріали можна поділити: за видом кінцевого зображення (світлопоглинальні, світлорозсіювальні, гідروفільно-гідрофобні) за сферою застосування (кінцева одиночна копія, проміжний оригінал, матриця або друкарська форма). Термографічні матеріали складаються здебільшого з підкладки та термочутливого шару. Як підкладку використовують папір, спеціальний папір (наприклад, пергаміновий папір, кальку), фольгу, металеві або металізовані пластини, плівковий матеріал.

5.4.1. Термографічні матеріали для термохімічних способів Процеси, що відбуваються у матеріалах, призначених для термохімічних способів одержання зображень, ґрунтуються на змінному світлопоглинанні під час нагрівання термочутливого шару в результаті відновлення металоорганічних сполук до металу. Так, терморективні папери містять копіювальний шар зі

стеаратом заліза, який під час нагрівання відновлюється до вільного металу, що надає зображенню коричневого кольору. Деякі шари містять органічні аміномолібдати з відновниками, солі органічних кислот (стеаринової, пальмітинової, олеїнової тощо), благородний метал (срібло) або метал зі змінною валентністю (залізо, мідь, ртуть, олово тощо) з циклічним органічним відновником (гідрохіноном, пірогалолом тощо) та регулятором швидкості реакції. Окрім наведених композицій копіювальних шарів, існують і інші, у яких як відновники використано різні органічні та неорганічні сполуки.

Окремо слід розглянути матеріали з умістом азотосполук (діазосполук). Це, наприклад, термочутливий матеріал, який містить діазосполуку та азотосполуку в різних шарах, які розділені між собою восковим шаром (або іншим), який здатен розплавлятися за температури проявлення. Під дією температури (операція проявлення) проміжний шар розплавляється, унаслідок чого виникає контакт між двома компонентами зі створенням азотобарвника та позитивного зображення. Після проявлення зображення фіксують за допомогою УФ-випромінювання.

Окрім процесів відновлення металу та утворення азотобарвника, існують і інші термохімічні процеси, у яких використовуються хімічні реакції, що створюють зображення під дією температури, проте найбільшого поширення набули матеріали та процеси, у яких використовуються реакції з відновлення металу з уведенням до складу копіювального шару пігментів з малим коефіцієнтом відбиття в ІЧ-зоні спектра.

Із термографічних способів особливо значущі процеси профарбовування шару після нагрівання. Для таких процесів можна використовувати матеріал, що складається з підкладки та двох послідовних шарів, які різняться між собою температурою плавлення. Після ІЧ-експонування опромінені ділянки шару набувають більшої липкості і проявляються пігментом.

5.4.2. Термографічні матеріали для термофізичних способів

Для отримання зображення у результаті термофізичних процесів найчастіше використовують термочутливий шар, у якому змінюються оптичні властивості полімерного шару (відбивання, пропускання, переломлення світла у видимій зоні) під дією тепла. При цьому можна одержувати зображення трьох видів - світлопоглинаюче на більш світлому фоні; прозоре на непрозорому фоні або

гідрофільно-гідрофобне.

Найбільш поширений спосіб, за якого зафарбовану підкладку (наприклад, чорну) покривають матованим полімерним шаром, що повністю розсіює світло і через це підкладку не видно. Після теплового експонування полімерний шар стає прозорим на тих ділянках, на які подіяло ІЧ-випромінювання, а створене позитивне зображення набуває того кольору, у який зафарбовано підкладку. Барвник може бути диспергований безпосередньо до термочутливого шару. Полімерний шар деяких матеріалів прозорий, але під дією тепла стає матовим (непрозорим), створюючи негативне зображення.

Матеріал на плівковій прозорій основі з пігментованим термочутливим шаром, який містить дисперсійні частинки гідрофобного полімеру у водорозчинному зв'язуючому з домішками поверхнево-активних речовин (ПАР), що вводяться в шар для збільшення ступеня гідрофільності, під дією теплової енергії шар втрачає свою здатність розчинятись у воді. Тому після контактного експонування ІЧ-випромінюванням з боку термографічної плівки її вимивають водою (видаляючи тим самим не нагріті ділянки шару) і одержують позитивну прозору копію. Експонування можна виконувати і за допомогою нагрітого рельєфного зображення (штампу, металевої друкарської форми високого друку, термодрукувальної головки тощо).

Для отримання гідрофільно-гідрофобного зображення застосовують два типи полімерних матеріалів. Матеріали першого типу вибірково нагрівають до 90-100 °С контактуванням з нагрітою поверхнею або за допомогою ІЧ-випромінювання (нагрівання не більше 0,1 с) зі зміною прозорості шару.

Матеріали другого типу в термочутливому шарі містять: частинки гідрофобного полімеру (діаметром 0,1 мкм і температурою склування понад 40 °С), ПАР, водорозчинне зв'язуюче та речовину, що поглинає світло. Під дією тепла змінюється ступінь гідрофільності, водорозчинності та водопроникності шару.

5.4.3. *Матеріали для фототермографії*

Для фототермографічних процесів використовують шари з умістом йодидів свинцю або інших металів. Ці матеріали складаються з паперової або плівкової основи, на яку вакуумним випаровуванням нанесено шар йодиду свинцю

завтовшки 5-50 мкм. Йодид може бути у вигляді дисперсії у шарі желатини або полівінілового спирту.

Інші матеріали можуть мати скляну, полімерну або металеву (мідну, алюмінієву, цинкову пластину) основи, на які послідовно нанесено шар неорганічного матеріалу (сірки, галогенідів, сульфідів, телуридів селену тощо) та металевий шар (срібний, мідний, цинковий тощо) завтовшки 100-1000 Å. Матеріал експонують протягом 20 с через оригінал, потім 20 с нагрівають пластину з боку підкладки до температури 100-140 °С. У результаті метал зберігається лише на експонованих ділянках матеріалу, а з неекспонованих дифундує у шар неорганічного матеріалу. Це явище називають «термоприсадками». Фототермографічні матеріали забезпечують високу роздільну здатність від - 220 мм⁻¹ і вище.

5.5. Особливі термографічні процеси

5.5.1. Адгерографія

Сутність цього способу полягає у вибірковій сублімації легколетких мінеральних масел під дією тепла та у візуалізації масляного зображення порошкоподібним пігментом. Масляний шар може бути нанесений на копіювальний матеріал (наприклад, папір), який контактує з оригіналом та експонується ІЧ-випромінюванням до вибіркового нагрівання відповідних ділянок матеріалу, або масло тонким шаром наносять на оригінал, притискають його до паперу та експонують ІЧ-випромінюванням. Унаслідок нагрівання відбувається дистиляція масла з ділянок, що відповідають елементам зображення на оригіналі. Візуалізація зображення виконується порошкоподібним пігментом.

5.5.2. Електротермографія

Способи електротермографії ґрунтуються на здатності деяких термочутливих шарів збільшувати свою електропровідність під час нагрівання. Існують два принципово різні способи отримання зображень на електротермочутливих матеріалах.

Технологічний процес за першим варіантом відбувається за такою технологічною схемою: нанесення на копіювальний шар рівномірного поверхневого заряду; опромінювання матеріалу через оригінал ІЧ-

випромінюванням або локальне нагрівання шару іншим способом; проявлення зображення будь-яким електрофотографічним способом (наприклад, каскадним або способом «магнітний пензель»). Як проявник можна використати суміш залізних стружок та пігменту.

Технологічний процес за другим варіантом полягає в тому, що електростатичне зарядження матеріалу провадять після локального нагрівання шару. При цьому приховане зображення створюється у результаті стікання зарядів з нагрітих ділянок, розміщених відповідно до елементів зображення оригіналу. Проявлення виконують за допомогою трибоелектрично зарядженого порошку.

Матеріали, застосовувані в електротермографії зазвичай складаються з підкладки, електропровідного підшару та електрофототермографічного шару з умістом фотопровідної речовини, яка є чутливою до ІЧ-випромінювання. Як підкладку застосовують електроізоляційні матеріали, скло, полімерні плівки з металевим покриттям, пергаментний папір. Окрім підкладок, застосовують і тонкі металеві пластини. У цьому випадку підкладка буде виконувати функції електропровідного покриття. Електротермофотографічний шар складається з термопластичного полімеру, у який дисперговано фотопровідник.

5.5.3. Електроіскровий спосіб

Особливим термографічним способом є також електроіскровий спосіб копіювання, який ґрунтується на використанні теплової дії електричного (іскрового) розряду для випалювання зображення на різних матеріалах. Найчастіше застосовують цей спосіб для виготовлення ротаторних (трафаретних) та офсетних форм для оперативної поліграфії. Ще його можна використовувати і для виготовлення одиночних копій. Для цього беруть тришаровий електротермічний папір, який складається з паперової основи, струмопровідного шару та білого пігментного шару. Пігментний шар складається із сульфіду цинку, оксиду цинку, сульфату барію, бланкфіксу та зв'язуючого. У процесі копіювання іскровий розряд, який виникає між голкою та струмопровідним шаром, руйнує верхній білий пігментний шар, оголюючи при цьому чорний струмопровідний сажовий шар. Уведенням у пігментний шар люмінесцентних речовин виготовляють копії, суміщенням яких зі світлочутливим матеріалом можна отримувати негативи без використання освітлювачів. Електротермічні копії не потребують

додаткової обробки та спеціальних умов зберігання, зображення на них не стирається і не змінює забарвлення.

Електроіскровим способом можна отримувати копії на простих паперах та плівках. Для цього між іскровою голівкою та матеріалом розміщують плівку, продукти згоряння якої закріплюються на поверхні матеріалу.

НЕ 2.5 Контроль якості елементів репрографічних систем.

6.1.1 Класифікація об'єктів

Виходячи з механізму взаємодії з оптичним випромінюванням випадкові об'єкти можна розділити на три великі групи: неперервні випадкові неоднорідні середовища, шорсткі поверхні та дисперсні середовища. Такі об'єкти модулюють амплітуду, фазу та поляризацію хвилі, що взаємодіє з ними і в результаті утворюється випадково-неоднорідне поле.

6.1.1.1. Неперервні випадкові неоднорідні середовища

Під неперервним випадковим середовищем будемо розуміти середовище, діелектрична проникність якого $\varepsilon(\vec{r}, t)$ є неперервною функцією простору та часу. Прикладами неперервних випадкових середовищ є турбулентності в тропо- та іоносфері планет, турбулентності в рідинах, прозорі біологічні середовища, свілі в оптичних деталях та інше.

У випадку слабких флуктуацій діелектричної проникності можна зробити ряд наближень. Розглянемо випадкове середовище одиничного об'єму dV з діелектричною проникністю $\varepsilon(\vec{r}, t)$, що є випадковою функцією часу та координат простору. Її можна записати як суму середнього значення $\langle \varepsilon \rangle$ та флуктуаційної частини:

$$\varepsilon(\vec{r}, t) = \langle \varepsilon(\vec{r}, t) \rangle [1 + \varepsilon_1(\vec{r}, t)], \quad (6.1.1.1)$$

де ε_1 - флуктуації з нульовим середнім значенням $\langle \varepsilon_1 \rangle = 0$.

Показник заломлення можна записати як:

$$n(\vec{r}, t) = \sqrt{\varepsilon(\vec{r}, t) / \varepsilon_0} = \langle n(\vec{r}, t) \rangle [1 + n_1(\vec{r}, t)], \quad (6.1.2)$$

де ε_0 - діелектрична проникність вакууму, а n - флуктуації показника заломлення.

Для малих флуктуацій приблизно маємо:

$$\varepsilon_1(\vec{r}, t) \approx 2n_1(\vec{r}, t). \quad (6.1.3)$$

Будемо вважати, що діелектрична проникність незмінна впродовж часу спостереження, так що її можна вважати незалежною від часу. Окрім того, нехай середня діелектрична проникність постійна і збігається з діелектричною проникністю вакууму:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\vec{r}) &= \varepsilon_0 [1 + \varepsilon_1(\vec{r})], \\ n(\vec{r}) &= 1 + n_1(\vec{r}). \end{aligned} \quad (6.1.4)$$

Для статистичного ізотропного середовища, кореляційна функція $\langle \varepsilon_1(\vec{r}_1') \varepsilon_1(\vec{r}_2') \rangle$ залежить тільки від абсолютного значення відстані $r = |\vec{r}| = |\vec{r}_1' - \vec{r}_2'|$:

$$\langle \varepsilon_1(\vec{r}_1') \varepsilon_1(\vec{r}_2') \rangle = \Psi_\varepsilon(r) = 4\Psi_n(r), \quad \langle n_1(\vec{r}_1') n_1(\vec{r}_2') \rangle = \Psi_n(r). \quad (6.1.5)$$

Згідно з теоремою Вінера-Хінчина, Фур'є-перетворення від кореляційної функції $\Psi_n(\vec{r})$ є спектральною густиною випадкового середовища $S_n(\vec{k})$:

$$S_n(\vec{k}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_n(\vec{r}) \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) dV. \quad (6.1.6)$$

Для опису неперервного випадкового неоднорідного середовища запропоновано кілька моделей представлення спектральної густини $S_n(\vec{k})$, таких як модель Букера-Гордона, гаусівська модель та модель спектру Колмогорова.

Модель Букера-Гордона базується на експоненційній кореляційній функції середовища:

$$\Psi_n(r) = \langle n_1^2 \rangle \exp(-r/l). \quad (6.1.7)$$

Згідно з цією моделлю випадкове середовище характеризується дисперсією $\langle n_1^2 \rangle$, та радіусом кореляції l , на якому значення кореляційної функції зменшується в e разів у порівнянні з її значенням для $r = 0$. Так радіус кореляції вказує на інтервал, у межах якого властивості середовища корельовані. Радіус кореляції називають також масштабом турбулентності, оскільки він характеризує певний середній розмір турбулентних утворень. Проте експоненціальний характер кореляційної функції зумовлений більше простотою математичних викладок, ніж фізичними властивостями середовища.

На практиці, для опису випадкового середовища, буває зручною гаусівська апроксимація кореляційної функції :

$$\Psi_n(r) = \langle n_1^2 \rangle \exp(-r^2/l^2), \quad (6.1.8)$$

з якої легко визначити спектральну густину:

$$S_n(k) = \langle n_1^2 \rangle \left(\frac{l}{2\sqrt{\pi}} \right)^3 \exp \left[-\frac{(kl)^2}{4} \right]. \quad (6.1.9)$$

Але ці дві моделі не можуть повністю пояснити особливості явища розсіювання оптичного випромінювання в турбулентній атмосфері чи океані.

А.М. Колмогоров розробив адекватну теорію розвинутої турбулентності. Згідно з Колмогоровим турбулентні вихорі характеризуються зовнішнім L_0 та внутрішнім l_0 масштабами турбулентності. Поділимо всю область зміни масштабу турбулентних вихорів на три інтервали:

а) енергетичний інтервал (розмір вихора більший L_0). Турбулентність у зовнішньому масштабі анізотропна (див. рис. 6.1.1). Спектр у ньому залежить від умов виникнення турбулентності. Тому немає загальної формули, що описує турбулентні вихорі в цьому інтервалі.

б) інерційний, або Колмогоровський інтервал (розмір вихора більший за l_0 і менший за L_0). У цьому інтервалі кінетична енергія вихорів переважає енергію дисипації через в'язкість і турбулентність має переважаючий ізотропний характер. Спектр турбулентності пропорційний $K^{-11/3}$, де $K = 2\pi/l$ (вихрове хвильове число).

в) в'язкий інтервал (l_0 більше за розмір вихора). У цьому інтервалі дисипація енергії через в'язкість переважає кінетичну енергію, тому спектр дуже вузький.

Для зручності використаємо структурну функцію флуктуацій середовища, $D_\varepsilon(r) = \langle |\tilde{\varepsilon}(\vec{r}_1) - \tilde{\varepsilon}(\vec{r}_2)|^2 \rangle$, яка для досить великих r описується законом двох третіх Колмогорова-Обухова:

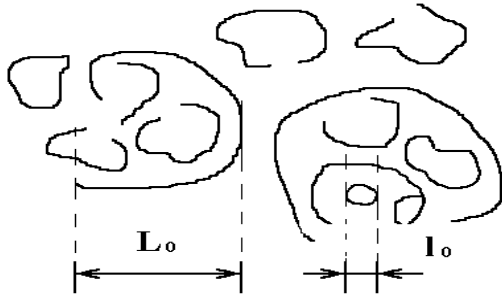


Рис. 6.1.1. Турбулентні вихори; показані зовнішній та внутрішній масштаби.

$$D_\varepsilon(r) \approx C_\varepsilon^2 r^{2/3}, \quad r \gg l_0, \quad (6.1.10)$$

де C_ε - структурна константа. Для малих r структурна функція зростає за квадратичним законом:

$$D_\varepsilon(r) \approx C_\varepsilon^2 l_0^{-4/3} r^2, \quad r \ll l_0. \quad (6.1.11)$$

Внутрішній масштаб l_0 входить у формули (6.1.10) та (6.1.11) так, що значення обох виразів однакові для $r = l_0$. Відповідні графіки зображені

пунктирними лініями на рис. 6.1.2, а суцільною лінією подано реальний хід структурної функції $D_\varepsilon(r)$. Отже структурну функцію $D_\varepsilon(r)$ можна апроксимувати на окремих інтервалах такими функціями:

$$D(r) = \begin{cases} C_\varepsilon^2 l_0^{-4/3} r^2 = 2\sigma_\varepsilon^2 r^2 l_0^{-4/3} L_0^{-2/3}, & r \ll l_0, \\ C_\varepsilon^2 r^{2/3} = 2\sigma_\varepsilon^2 (r/L_0)^{2/3}, & l_0 \ll r \ll L_0, \\ C_\varepsilon^2 L_0^{2/3} = 2\sigma_\varepsilon^2, & L_0 \ll r. \end{cases} \quad (6.1.12)$$

Спектральна густина для будь-яких r буде:

$$S_n(k) = 0.033 C_\varepsilon^2 (k^2 + 1/L_0^2)^{-11/6} e^{-k^2/k_m^2}, \quad (6.1.13)$$

де $k_m = 5.92/l_0$. Це співвідношення ще називають спектром Кармана.

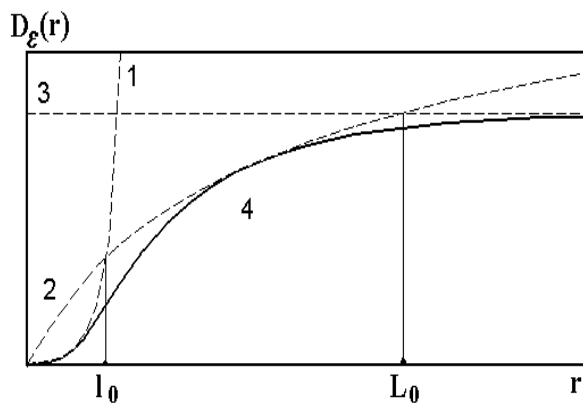


Рис. 6.1.2. Типова поведінка: $D_\varepsilon(r)$ (крива 4); $C_\varepsilon^2 l_0^{-4/3} r^2$ (1); $C_\varepsilon^2 r^{2/3}$ (2); $C_\varepsilon^2 L_0^{2/3}$ (3).

Звичайно, поведінка флуктуацій ε в реальному турбулентному середовищі більш складна, ніж наведені апроксимації. Проте співвідношення (6.1.13) досить добре описує просторовий спектр турбулентних флуктуацій в оптиці та радіофізиці.

Наведені вище співвідношення, ми розглянемо пізніше при вирішенні задачі

кореляційно-оптичної діагностики турбулентності.

Якщо товщина турбулентного шару досить мала, ми можемо розглянути нескінченно тонкий екран. Падаюча хвиля модулюється таким екраном у залежності від його комплексної функції пропускання:

$$f(\vec{\rho}) = A(\vec{\rho}) \exp[i\Phi(\vec{\rho})], \quad (6.1.14)$$

де $A(\vec{\rho})$ - амплітудна функція пропускання, аргумент експоненційного фактора $\Phi(\vec{\rho})$ визначає фазову модуляцію хвилі.

Коли пропускання екрана має вигляд $f(\vec{\rho}) = \exp[i\Phi(\vec{\rho})]$, де $\Phi(\vec{\rho})$ - випадкова функція, такий екран називають випадковим фазовим екраном (ВФЕ). У площині ВФЕ модулюється тільки фаза хвилі, а за екраном присутня як фазова, так і амплітудна модуляції. Модель ВФЕ часто використовується в оптиці та радіофізиці. Одним із прикладів ВФЕ є шорстка поверхня з однорідним пропусканням або відбиванням. Проходження плоскої хвилі через ВФЕ ми розглянемо пізніше.

6.1.2. Шорсткі поверхні

Розглянемо параметри, якими характеризується шорстка поверхня.

Шорстку поверхню можна зобразити у вигляді двомірного розподілу висоти $z = \zeta(x, y)$. Цей рельєф є найповнішою характеристикою поверхні. З нього можна визначити всі статистичні моменти поверхні, розподіли та спектри. Експериментально побудувати функцію $z = \zeta(x, y)$ можна з комбінацій профілів, отриманих механічними чи оптичними профілометрами. Найчастіше, для кількісної оцінки шорсткої поверхні, використовують наступні параметри: середньоквадратичне та середньоарифметичне відхилення профілю від базової лінії, функцію розподілу висот нерівностей, коефіцієнти асиметрії та ексцесу, спектр потужності, автокореляційну функцію та радіус кореляції.

Середньоквадратичне відхилення профілю від базової лінії

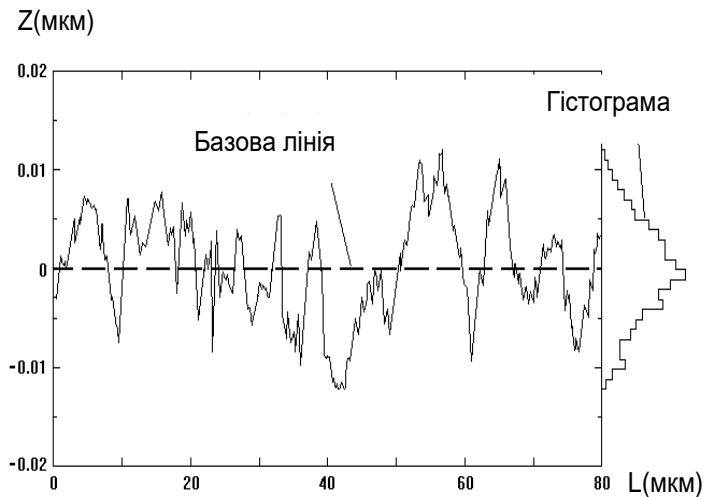


Рис.6.1.3. Схематичне представлення шорсткої поверхні і відповідна гістограма висот

Середньоквадратичне відхилення профілю від базової лінії σ_h є найбільш важливим та найуживанішим статистичним параметром шорсткої поверхні. На рис. 6.1.3 показано поперечний переріз шорсткої поверхні. Цей профіль поміряно вздовж базової лінії L , яка проходить посередині розподілу висот, тобто суми

площ під кривою профілю і під базовою лінією рівні. Математично базова лінія визначається:

$$\sum_{i=1}^N z_i = 0. \quad (6.1.15)$$

Тепер розглянемо N дискретних, рівновіддалених точок вздовж базової лінії L . Середньоквадратичне відхилення профілю від базової лінії σ_h визначимо як:

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N z_i^2}. \quad (6.1.16)$$

Середньоарифметичне відхилення профілю від базової лінії

Для характеристики оптичних поверхонь досить часто використовують середньоарифметичне відхилення профілю від базової лінії R_a :

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_i|. \quad (6.1.17)$$

Деколи корисний параметр R_z . Він розраховується по усередненій різниці між п'ятьма найвищими і п'ятьма найнижчими точками на базовій довжині.

Функція розподілу висот, асиметрія та ексцес

Найбільш повну інформацію про поверхню можна отримати з аналізу її функції розподілу висот. Функція розподілу висот показує долю висот, що лежать

у певному інтервалі. Дискретна функція розподілу називається гістограмою. Приклад гістограми наведений на рис. 6.1.3.

Коефіцієнт асиметрії є мірою асиметрії профілю відносно базової лінії. Наприклад, якщо на практично гладкій поверхні є порівняно глибокі ями, то функція розподілу не буде симетричною і коефіцієнт асиметрії буде значним. Коефіцієнт ексцесу характеризує переважну концентрацію висот біля базової лінії, чи навпаки.

Асиметрію розподілу, приклад якого наведено на рис. 6.1.4, можна математично визначити як:

$$K_S = \frac{1}{\sigma_h^3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^3. \quad (6.1.18)$$

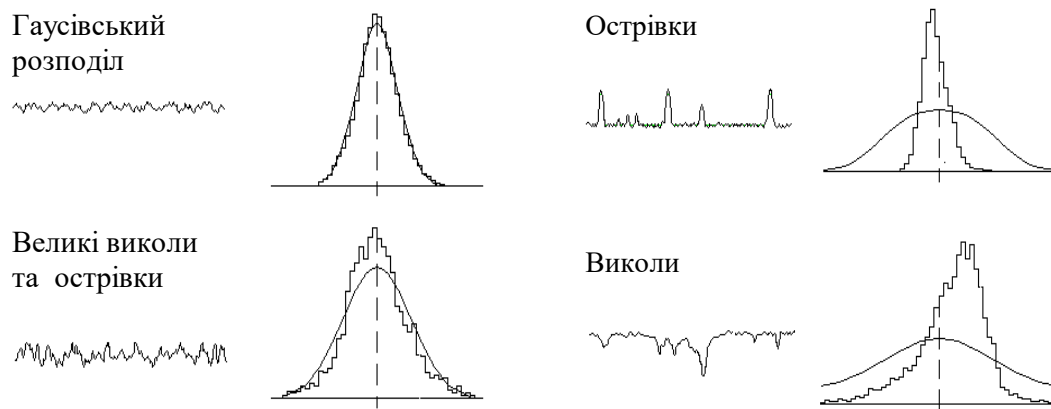


Рис. 6.1.4. Функція розподілу по висотах та еквівалентний гаусівський розподіл для різних поверхонь.

Знак коефіцієнта асиметрії визначає більшу (плюс) чи меншу (мінус) частину висот вище базової лінії.

Коефіцієнт ексцесу визначається як:

$$K_K = \frac{1}{\sigma_h^2} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^4. \quad (6.1.19)$$

Профілі, зі значною кількістю ям та частинок на поверхні мають пропорційно більшу частку висот на хвостах функції розподілу (рис. 6.1.4, нижній лівий). Це дасть коефіцієнт ексцесу більше 3. Якщо профілі мають більшу частку висот коло базової лінії, то коефіцієнт ексцесу менший 3. Для гаусівського розподілу коефіцієнт ексцесу дорівнює 3.

Автокореляційна функція та радіус кореляції

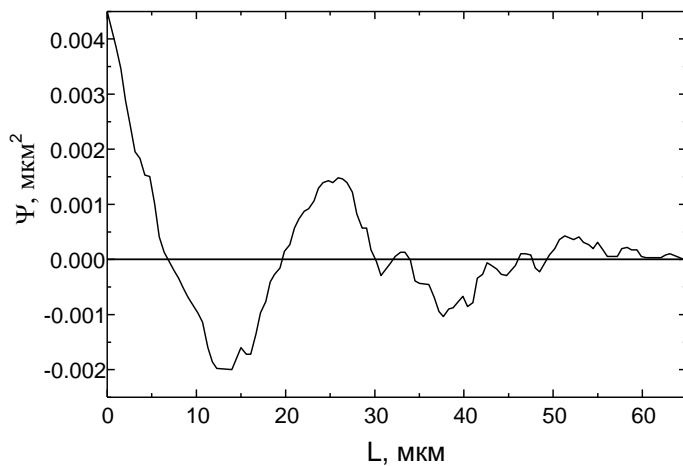


Рис. 6.1.5. Автокореляційна функція профілю поверхні

спектральну густину профілю поверхні, який використовується для розрахунку кутового розсіювання шорсткою поверхнею.

Радіус кореляції шорсткої поверхні оцінюється за автокореляційною функцією на рівні $1/e$ (0.368) її максимального значення. І хоч радіус кореляції можна отримати з коректних експериментальних даних, він може не відповідати істинному радіусу кореляції поверхні. Це можливе, коли не достатня довжина профілю. У цьому випадку говорять про обмежену область даних.

Рельєф традиційно полірованої поверхні ізотропний та випадковий. Ізотропність означає, що профілі поверхні в різних напрямках подібні. Випадковість шорсткої поверхні означає, що її профіль еквівалентний суперпозиції ряду періодичних структур із випадковою амплітудою, періодом та орієнтацією.

Спектр потужності профілю поверхні

Спектр потужності є частотним спектром шорсткої поверхні, поданим в обернених довжинах періоду. Він використовується при розрахунку кутового розсіяння шорсткою поверхнею. Фур'є - перетворення спектра потужності дає автокореляційну функцію поверхні. Однак профіль поверхні отримати неможливо, оскільки втрачено фазові співвідношення між складовими профілю.

Автокореляційна функція

профілю поверхні на обмеженій довжині, отримана з дискретного набору даних, записується як:

$$\Psi(l) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-l} z_i \cdot z_{i+l} , \quad (6.1.20)$$

$$l = 0, 1, 2, \dots, N-1.$$

Приклад автокореляційної функції наведено на рис. 6.1.5.

Фур'є - перетворення від автокореляційної функції дає

6.1.3. Дисперсні середовища

Природні об'єкти, такі як дощ, дим, град, аерозолі, червоні кров'яні тільця та інші, містять світлорозсіюючі частинки з випадковим розподілом по розмірах. Розмір сферичної частинки задається її діаметром. Якщо форма частинки відмінна від сферичної, то її діаметр може бути визначений як відстань між точками перетину поверхні частинки лінією, що проходить через центр гравітації частинки. Звичайно, що таких ліній можна провести безліч. Розміром несферичної частинки буде результат статистичного усереднення всіх вихідних діаметрів частинки. Числове значення розміру буде залежати від способу усереднення діаметрів. Розрізняють:

- геометричне середнє:

$$\bar{a}_g = \left(\prod_i a_i \right)^{1/n}, \quad (6.1.21)$$

- арифметичне середнє:

$$\bar{a}_a = \frac{1}{n} \sum_i a_i \quad (6.1.22)$$

- та гармонічне середнє:

$$\bar{a}_h = \left(\frac{1}{n} \sum_i \frac{1}{a_i} \right)^{-1}, \quad (6.1.23)$$

де n - кількість діаметрів.

Реальні частинки в дисперсній системі відрізняються розмірами, тому важливо знати їх розподіл по розмірах. Нехай $n(a)da$ кількість частинок із розміром, що лежить у діапазоні від a до $a + da$. Сумарна кількість частинок в одиниці об'єму (концентрація) буде визначатися:

$$c = \int_0^{\infty} n(a)da. \quad (6.1.24)$$

Ми можемо отримати також густину частинок із розміром, що лежить у діапазоні від a до $a + da$:

$$w(a) = \frac{n(a)}{c}, \quad \int_0^{\infty} w(a)da = 1. \quad (6.1.25)$$

Аналогічно можна отримати вираз для середнього розміру частинок $\langle a \rangle$ та

дисперсії розмірів σ^2 :

$$\langle a \rangle = \int_0^{\infty} a w(a) da, \quad \sigma^2 = \int_0^{\infty} (a - \langle a \rangle)^2 w(a) da. \quad (6.1.26)$$

6.2. Проходження плоскої хвилі через нескінченний фазовий екран

Під випадковим фазовим екраном розуміють екран, функція пропускання якого задається співвідношенням $f(\vec{\rho}) = \exp[i\Phi(\vec{\rho})]$, де Φ - дійсна випадкова функція. У площині такого екрана модулюється тільки фаза випадкової хвилі, а амплітуда (а отже, й інтенсивність) залишається незмінною. У півплощині $z > 0$, фазовий екран модулює як амплітуду, так і фазу хвилі, що пройшла.

При падінні плоскої хвилі $u_p = e^{ikz}$ на нескінченний ВФЕ в площині екрана $z = 0$ утворюється граничне поле:

$$v(\vec{\rho}) = \exp[i\Phi(\vec{\rho})] u_p \Big|_{z=0} = \exp[i\Phi(\vec{\rho})]. \quad (6.2.6)$$

Розглянемо співвідношення між статистичними моментами поля, що пройшло крізь екран, та кореляційною функцією фази екрана:

$$\Psi_{\varphi 0}(\vec{\rho}) = \langle \tilde{\Phi}(\vec{\rho}_1) \tilde{\Phi}(\vec{\rho}_2) \rangle = \sigma_{\varphi 0}^2 K(\vec{\rho}), \quad (6.2.7)$$

де $\sigma_{\varphi 0}^2$ - дисперсія фази, а $K(\vec{\rho})$ - коефіцієнт кореляції фази екрана.

Припускаємо, що флуктуації фази Φ статистично однорідні, в площині $z = 0$, мають нульове середнє значення ($\bar{\Phi} = 0$) і задовольняють нормальному закону розподілу.

Маючи на увазі, що для розподіленої за нормальним законом величини α з $\bar{\alpha} = 0$, виконується співвідношення $\langle e^{i\alpha} \rangle = \exp(-\bar{\alpha}^2 / 2)$, отримуємо для граничного поля:

$$\Gamma_v(\vec{\rho}) = \langle v(\vec{\rho}_1) v^*(\vec{\rho}_2) \rangle = \langle \exp\{i[\Phi(\vec{\rho}_1) - \Phi(\vec{\rho}_2)]\} \rangle = \exp\left\{-\frac{1}{2} \langle [\Phi(\vec{\rho}_1) - \Phi(\vec{\rho}_2)]^2 \rangle\right\}. \quad (6.2.8)$$

Однак, для $\bar{\Phi} = 0$, середньоквадратична різниця флуктуацій фази є її структурною функцією $D_{\varphi}(\vec{\rho})$, зв'язаною з кореляційною $\Psi_{\varphi 0}(\vec{\rho})$ згідно з рівнянням (6.2.9).

Тому

$$\Gamma_v(\vec{\rho}) = \exp\left[-\frac{1}{2}D_\varphi(\vec{\rho})\right] = \exp\left[\Psi_{\varphi_0}(\rho) - \Psi_{\varphi_0}(0)\right] = \exp\left\{\sigma_{\varphi_0}^2[K(\vec{\rho}) - 1]\right\}. \quad (6.2.9)$$

Усереднене поле, функцію когерентності, а також поперечну кореляційну функцію поля, що пройшло крізь екран, можна знайти за формулами:

$$\bar{u} = v_0 e^{ikz} = \exp\left\{-\sigma_{\varphi_0}^2/2 + ikz\right\}, \quad (6.2.10)$$

$$\Gamma_\perp(\vec{\rho}) = \Gamma_v(\vec{\rho}) = \exp\left[-\frac{1}{2}D_\varphi(\vec{\rho})\right], \quad (6.2.11)$$

$$\Psi_\perp(\vec{\rho}) = \Psi_v(\vec{\rho}) = \exp\left\{\sigma_{\varphi_0}^2[K(\vec{\rho}) - 1]\right\} - e^{-\sigma_{\varphi_0}^2}. \quad (6.2.12)$$

Для малих флуктуацій фази з (6.2.12) можна отримати:

$$\Psi_\perp(\vec{\rho}) \approx \sigma_{\varphi_0}^2 K(\vec{\rho}) = \Psi_\varphi(\vec{\rho}) \quad (\sigma_{\varphi_0}^2 \ll 1), \quad (6.2.13)$$

поперечна кореляційна функція збігається з $\Psi_\varphi(\vec{\rho})$ для всього півпростору $z > 0$.

Для великих флуктуацій фази ($\sigma_{\varphi_0}^2 \gg 1$), усереднене граничне поле $v_0 = e^{-\sigma_{\varphi_0}^2/2}$ дуже мале порівняно з одиницею, а величина $\exp\left\{\sigma_{\varphi_0}^2[K(\vec{\rho}) - 1]\right\}$ помітно відрізняється від нуля лише для малих значень ρ . Тому знехтуємо в (6.2.12) доданком $e^{-\sigma_{\varphi_0}^2}$ і розкладемо коефіцієнт $K(\vec{\rho})$ у ряд Тейлора.

Вважаючи, для простоти, флуктуації фази ізотропними, одержуємо:

$$K(\rho) = 1 + K''(0)\frac{\rho^2}{2} + \dots, \quad (6.2.14)$$

де штрихом позначено диференціювання ρ (лінійний член розкладу по ρ рівний нулю). Тому запишемо:

$$\Psi_\perp(\rho) \approx e^{1/2\sigma_{\varphi_0}^2 K''(0)\rho^2} = e^{-1/2|\Psi_\varphi''(0)|\rho^2} \quad (\sigma_{\varphi_0}^2 \gg 1), \quad (6.2.15)$$

де враховано, що другі похідні $K''(0)$ та $\Psi_\varphi''(0) = \sigma_{\varphi_0}^2 K''(0)$ від'ємні для нульового аргументу. З (6.2.15) можна побачити, що кореляція зникає для $\rho \geq \left|\sigma_{\varphi_0}^2 K''(0)\right|^{-1/2} \approx l_\varphi / \sigma_{\varphi_0}$, де $l_\varphi \sim \left|K''(0)\right|^{-1/2}$ - радіус кореляції фази.

Із цих співвідношень можна отримати оцінку для поперечного радіусу кореляції поля:

$$l_{\perp} \sim \frac{l_{\varphi}}{\sigma_{\varphi 0}} \quad (\sigma_{\varphi 0}^2 \gg 1). \quad (6.2.16)$$

Отже, для $\sigma_{\varphi 0}^2 \gg 1$, радіус кореляції поля в $\sigma_{\varphi 0}$ разів менший від радіусу кореляції фази екрана l_{φ} .

У багатьох задачах оптичної діагностики використовують статистичні характеристики окремо взятих амплітуди та фази хвилі. Для їх розрахунку, крім першої кореляційної функції комплексного поля $\Psi_{\perp}(\vec{\rho}) = \langle \tilde{u}(\vec{\rho}_1, z) \tilde{u}^*(\vec{\rho}_2, z) \rangle$, потрібна і друга кореляційна функція $\tilde{\Psi}_{\perp}(\vec{\rho}) = \langle \tilde{u}(\vec{\rho}_1, z) \tilde{u}(\vec{\rho}_2, z) \rangle$.

У випадку слабких флуктуацій $\sigma_{\varphi 0}^2 \ll 1$ та їх гаусового розподілу для кореляційних функцій амплітуди, фази і кореляції їх між собою, можна отримати наступні вирази:

$$\Psi_{A,\varphi}(\vec{\rho}, z) = \frac{1}{2} \left[\Psi_{\varphi}^0(\vec{\rho}) \mp \frac{k}{4\pi z} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{\varphi}^0(\vec{\rho}') \sin \frac{k(\vec{\rho} - \vec{\rho}')^2}{4z} d^2 \rho' \right], \quad (6.2.17)$$

$$\Psi_{A\varphi}(\vec{\rho}, z) = \frac{k}{8\pi z} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{\varphi}^0(\vec{\rho}') \cos \frac{k(\vec{\rho} - \vec{\rho}')^2}{4z} d^2 \rho', \quad (6.2.18)$$

де $\Psi_{\varphi}^0(\vec{\rho})$ - кореляційна функція фази в площині $z = 0$.

Для гауссівської кореляційної функції

$$\Psi_{\varphi}^0(\rho) = \sigma_{\varphi 0}^2 e^{-\frac{\rho^2}{2l_{\varphi}^2}} \quad (6.2.19)$$

ці інтеграли легко обчислити. Так, для $\rho = 0$ отримуємо:

$$\sigma_{A,\varphi}^2(z) = \frac{\sigma_{\varphi 0}^2}{2} \left(1 \mp \frac{1}{1 + D^2} \right), \quad (6.2.20)$$

де $D = D(z) = 2z / kl_{\varphi}^2$.

Величину D називають хвильовим параметром. Він показує, скільки фазових неоднорідностей поміщається в одній зоні Френеля розміром $\pi\lambda z = 2\pi^2 z / k$. У залежності від хвильового параметра можна виділити три області (зони) z по відношенню до окремої неоднорідності, а саме: ближня ($D \ll 1$

), зона Френеля ($D \sim 1$) і зона Фраунгофера ($D \gg 1$). Зрозуміло, що в ближній зоні ($D \ll 1$) будуть переважати фазові флуктуації $\sigma_A^2 \ll \sigma_\varphi^2 \approx \sigma_{\varphi_0}^2$. При віддаленні від екрана амплітудні флуктуації будуть зростати, а фазові зменшуватись. У зоні Фраунгофера ($D \rightarrow \infty$) вони вирівнюються й досягають граничного значення:

$$\sigma_{A,\varphi}^2 \Big|_{z \rightarrow \infty} = \frac{1}{2} \sigma_{\varphi_0}^2. \quad (6.2.21)$$

Кореляція між амплітудою та фазою поля в ближній та дальній зонах мала та досягає максимуму для $D \sim 1$.

Флуктуації інтенсивності поля характеризуються кореляційною функцією інтенсивності:

$$\Psi_I(\vec{\rho}, z) = \langle \tilde{I}(\vec{\rho}_1, z) \tilde{I}(\vec{\rho}_2, z) \rangle = \langle I(\vec{\rho}_1, z) I(\vec{\rho}_2, z) \rangle - \overline{I^2} \quad (6.2.22)$$

та індексом мерехтіння:

$$\beta^2(z) = \frac{\langle I^2(z) \rangle - \langle I(z) \rangle^2}{\langle I(z) \rangle^2} = \frac{\sigma_I^2(z)}{\langle I(z) \rangle^2}. \quad (6.2.23)$$

Вважаючи $\langle I(z) \rangle = 1$, отримуємо:

$$\Psi_I(\vec{\rho}, z) = \langle I(\vec{\rho}_1, z) I(\vec{\rho}_2, z) \rangle - 1, \quad (6.2.24)$$

$$\beta^2(z) = \langle I^2(z) \rangle - 1 = \sigma_I^2(z). \quad (6.2.25)$$

Як і у випадку аналізу флуктуацій амплітуди та фази, значення Ψ_I та β^2 можуть бути розраховані тільки для двох граничних випадків: малих флуктуацій та фраунгоферової зони. Для малих флуктуацій маємо:

$$\Psi_I(\vec{\rho}, z) = 4\Psi_A(\vec{\rho}, z), \quad (6.2.26)$$

$$\beta^2(z) = 4\sigma_A^2(z). \quad (6.2.27)$$

Отже, при віддаленні від екрана флуктуації інтенсивності ведуть себе подібно до флуктуацій амплітуди.

Для зони Фраунгофера ($D \gg 1$), $\beta^2(z)$ прямує до граничного значення

$$\beta_\infty^2 = 2\sigma_{\varphi_0}^2, \quad \sigma_{\varphi_0}^2 \ll 1, \quad (6.2.28)$$

незалежно від вигляду кореляційної функції фази ВФЕ.

Кореляційна функція інтенсивності для далекої зони може бути записана як:

$$\Psi_I(\vec{\rho}, z) = |\Gamma_u(\vec{\rho})|^2 - |\bar{u}|^4 = |\Gamma_v(\vec{\rho})|^2 - |v_0|^4. \quad (6.2.29)$$

Вважаючи, що $\Gamma_v(0) = \bar{I} = 1$, отримуємо індекс мерехтіння в далекій зоні:

$$\beta_{z \rightarrow \infty}^2 = \Psi_I(0) = 1 - |v_0|^4. \quad (6.2.30)$$

Для часткового випадку гаусівського розподілу фазових флуктуацій ВФЕ,

коли $v_0 = e^{-\sigma_{\varphi_0}^2/2}$ і $\Psi_v(\vec{\rho})$ записується за допомогою рівняння (6.2.12), отримуємо:

$$\Psi_I(\vec{\rho}) = e^{-2\sigma_{\varphi_0}^2} \left\{ \exp[2\Psi_{\varphi}^0(\vec{\rho})] - 1 \right\}, \quad \beta^2 = 1 - e^{-2\sigma_{\varphi_0}^2}. \quad (6.2.31)$$

Для $\sigma_{\varphi_0}^2 \ll 1$ цей вираз переходить у (6.2.28). Для іншого часткового випадку, з нульовим середнім ($\bar{v}_0 = 0$), вирази (6.2.29) та (6.2.30) спрощуються:

$$\Psi_I(\vec{\rho}) = |\Gamma_v(\vec{\rho})|^2 = |\Psi_v(\vec{\rho})|^2, \quad \beta_{\infty}^2 = 1. \quad (6.2.32)$$

На рис. 6.2.1 показано залежність індексу β^2 від хвильового параметра $D = 2z / kl_{\varphi}^2$ для гаусівської функції кореляції фази та дисперсії $\sigma_{\varphi_0}^2$ від 0.1 до 5.

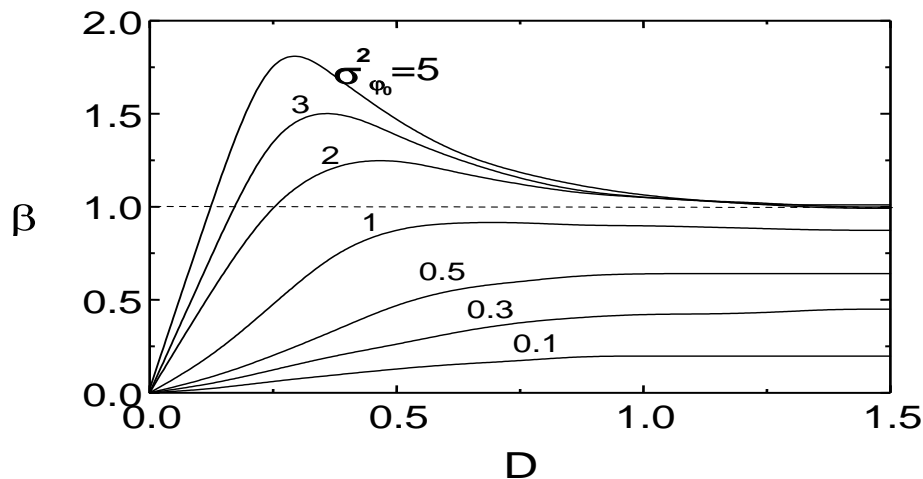


Рис. 6.2.1. Залежність індексу мерехтіння β^2 від параметра D .

Поведінку цих кривих ми вже частково розглянули.

$\beta^2 = \beta_{\infty}^2 = 1 - e^{-2\sigma_{\varphi_0}^2}$ в зоні Фраунгофера ($D \gg 1$) та

$\beta^2 = 2\sigma_{\varphi_0}^2 D^2 / (1 + D^2)$ для малих флуктуацій фази ($\sigma_{\varphi_0}^2 \ll 1$). Новим є наявність максимуму β^2 для $D \leq 1$ і значень $\sigma_{\varphi_0}^2 > 1$. Якісна оцінка цього факту дана в роботі, згідно якої для сильних флуктуацій ($\sigma_{\varphi_0}^2 \gg 1$) $\beta_{\max}^2 \sim \ln \sigma_{\varphi_0}^2$. Максимум індексу мерехтіння приходить на так звану зону фокусувань z_m , яка визначається так:

$$z_m = \frac{kl_{\varphi}^2}{\sigma_{\varphi_0}}. \quad (6.2.33)$$

Зрозуміло, що фокусування хвиль, а отже, й максимуми індексу мерехтіння властиві лише фазовим флуктуаціям екрана. Амплітудні флуктуації екрана приведуть до дифракційного згладжування флуктуацій інтенсивності, а отже, і до зменшення індексу мерехтіння.

6.3. РОЗСПІВАННЯ ХВИЛЬОВИХ ПОЛІВ

6.3.1. Дослідження світлорозсіяння шорсткими поверхнями

Шорсткі границі розділу різних об'єктів та середовищ випадковим чином перетворюють амплітуду, фазу, кореляційні параметри поля оптичного випромінювання.

Якість обробки будь-якої поверхні характеризується параметрами шорсткості. Шорсткість може бути оцінена з вимірювань профілю поверхні або розрахована з досліджень світлорозсіяння шорсткою поверхнею. Кожен із цих типів вимірювань має певні переваги й обмеження. Для вимірювання профілю поверхні використовують один із двох зондів - світловий промінь або механічний щуп. Механічний щуп може пошкодити поверхню, що виключено при використанні світлового променя. Чутливість сучасних профілометрів складає 1 ангстрем. Важлива перевага профілометричних методів - їх здатність виявляти локальні нерівності, подряпини, тріщини і т.д.

Оптичні методи знайшли широке використання в системах, призначених для контролю якості оброблених поверхонь. Їх перевага полягає в безконтактності, неруйнівності й здатності усереднювати в оптичному каналі по великій кількості нерівностей поверхні.

Перспективні кореляційно-оптичні методи дослідження та контролю шорсткості поверхонь, що базуються на використанні моделі випадкового фазового екрана (ВФЕ).

Проте модель ВФЕ накладає певні обмеження на досліджувані поверхні. Верхня межа діапазону контрольованих висот обмежена довжиною хвилі використовуваного випромінювання. До того ж, нерівності поверхні повинні бути розподілені за нормальним законом. Реальні ж поверхні мають обмежену кількість нерівностей і не обов'язково з гаусівським розподілом висот. До того ж, останнім часом стали більше уваги приділяти фрактальним властивостям деяких шорстких поверхонь.

У розділі 3 наведено результати дослідження ефективності та перспектив застосування кореляційно-оптичних методів контролю шорсткості поверхонь із негаусівською статистикою, фрактальних поверхонь та поверхонь з нерівностями, більшими від довжини хвилі.

6.3.1.1 Розсіяння світла шорсткими поверхнями

Теоретичне дослідження взаємодії випромінювання з шорсткою поверхнею спочатку було проведено Релеєм. Він вивчав дифракцію плоскої хвилі на поверхні з гармонічним профілем та глибиною менше довжини хвилі.

Книга, яка цитується найчастіше при розгляді питань розсіювання хвиль шорсткими поверхнями, написана Бекманом та Спізічино. Вони застосовували скалярне наближення Кірхгофа для опису розсіювання хвиль на періодичних та випадкових поверхнях. І хоча цим дослідженням скоро буде сорок років, вони продовжують розглядатися як фундаментальні.

У більш сучасній монографії Баса та Фукса розглянуто підхід Кірхгофа та метод малих збурень для опису більш складних поверхонь: із кількома масштабами, з перевідбиваннями, з ефектами самозатінення.

На розсіювання електромагнітних хвиль шорсткими поверхнями впливають численні фактори. Крім висоти і поперечного масштабу нерівностей, які порівнюються з довжиною хвилі зондуючого випромінювання, необхідно враховувати багато інших експериментальних параметрів: розмір площі розсіювання, напрямок освітлення, стан поляризації зондуючого пучка, коефіцієнт

відбивання та показник заломлення. У залежності від співвідношення між згаданими параметрами, застосовується той чи інший метод обчислення розсіяного поля. Найбільш широко застосовуються два підходи, а саме метод малих збурень і метод Кірхгофа. Ці методи охоплюють широкий клас шорстких поверхонь, засновані на досить простих припущеннях і на них базуються стандартизовані діагностичні методи. Теорія малих збурень використовується для поверхонь із малими та пологими нерівностями, теорія Кірхгофа - для плавних нерівностей. Розглянемо межі застосування цих підходів для шорсткої поверхні з розподілом висоти, що задається рівнянням: $z = \zeta(x, y) \equiv \zeta(\vec{\rho})$, де $\langle \zeta \rangle = 0$. Пологість нерівностей означає, що їх усереднені нахили невеликі:

$$\langle (\nabla_{\perp} \zeta)^2 \rangle \approx \frac{\sigma^2}{l_{\zeta}^2} \ll 1, \quad (6.3.1)$$

де $\sigma^2 \equiv \langle \zeta^2 \rangle$ - середньоквадратичне відхилення висоти від базової лінії $z = 0$, l_{ζ} - поперечний масштаб кореляції нерівностей.

Малість нерівностей означає, що моменти $\langle \zeta^m \rangle$ набагато менші, ніж відповідні степені довжини хвилі, $\langle \zeta^m \rangle \ll \lambda^m$, зокрема $\sigma^2 \ll \lambda^2$.

Для плавних нерівностей величина відхилення ζ не обмежується, а умова пологості замінюється вимогою про малу кривизну нерівностей. Радіуси кривизни поверхні мікронерівностей R_c повинні бути більшими за λ :

$$R_c \gg \lambda \text{ або } kR_c \gg 1. \quad (6.3.2)$$

Для плавних нерівностей відношення σ / l_{ζ} може бути відносно великим.

6.3.1.2 Оптичні методи контролю шорсткості поверхонь

На даному етапі розвитку техніки дослідження та контролю шорстких поверхонь досягнуто значних успіхів. Розроблено комплекс методів та створено багато різноманітних систем діагностики шорстких поверхонь. Загальноновизнану перевагу серед них мають дистанційні, неруйнівні методи контролю. Застосування малопотужних джерел когерентного оптичного випромінювання робить перспективними оптичні методи контролю шорстких поверхонь. Ці методи можна

розділити на три великі групи: профільні інтерференційні та гетеродинні методи; методи, що базуються на вимірюванні інтенсивності розсіяного випромінювання; кореляційно-оптичні методи.

Перша група методів реалізована у вигляді метрологічних систем WYKO TOPO-3D, Zygo NewView5000 3-D Surface Profilers, Talysurf та інших моделей. Це досить складне та дороге обладнання, яке дозволяє отримувати карту висот шорстких поверхонь та всі можливі статистичні параметри поверхні в діапазоні висот від одного ангстрема до кількох мікрон.

До другої групи належать: метод індикатриси, рефлектометричний метод, метод дифузного розсіяння та інші. Ці методи не дозволяють отримати профіль поверхні, але дають усереднене значення середньоквадратичного відхилення профіля від базової лінії по досліджуваній ділянці поверхні шляхом вимірювання кутового розподілу інтенсивності розсіяного випромінювання. Чутливість даних методів складає кілька ангстрем, а верхня межа вимірюваних висот не перевищує десятої частини довжини хвилі зондуючого випромінювання.

Кореляційно-оптичні методи базуються на використанні моделі випадкового фазового екрана (ВФЕ). Це дає можливість отримати прості співвідношення між статистичними параметрами об'єкта та поля розсіяного ним випромінювання. Шорсткі поверхні не єдиний об'єкт, який можна описати з допомогою моделі ВФЕ. До таких об'єктів можна віднести фазово-неоднорідні об'єкти, турбулентності в рідинах та газах, оптичні кристали з дислокаціями та ін. Тобто кореляційно-оптичні методи дозволяють досліджувати широкий клас об'єктів. Кореляційно-оптичні системи контролю шорсткості поверхонь можуть бути виконані в лабораторному та портативному варіантах, із можливістю установки на станках та контролю поверхонь різної форми. Усереднення по великій площі контрольованої поверхні забезпечує високу чутливість (близько $2 \cdot 10^{-5}$) та швидкодію (кілька секунд) методів.

Проте кореляційно - оптичні методи, що базуються на моделі ВФЕ, мають певні обмеження. Верхня межа діапазону контрольованих висот обмежена довжиною хвилі використовуваного випромінювання. До того ж, нерівності поверхні повинні бути розподілені за нормальним законом. Реальні ж поверхні мають обмежену кількість нерівностей, не обов'язково мають гауссівський розподіл висот і можуть мати фрактальні властивості. Однією із ознак

фрактальності поверхні є те, що з необмеженим збільшенням поперечних розмірів фрактальної поверхні пропорційно зростає і радіус кореляції її нерівностей. Цей факт пояснює властивість самоподібності фрактальних структур, коли фрагмент поверхні більшого масштабу схожий на менший фрагмент. Це ускладнює застосування статистичних підходів, а, отже й моделі ВФЕ. Фрактальні або самоподібні об'єкти можна розглядати з точки зору теорії стохастичних та хаотичних коливань і характеризувати фрактальною, кореляційною, масовою, ємнісною та іншими розмірностями. Розмірносні параметри оцінюються за нахилом логарифмічної залежності просторово-частотного спектру фрактальної поверхні або спектра потужності випромінювання, розсіяного поверхнею. Проте ці методи визначення розмірностних параметрів мають певні обмеження. Тому актуальна розробка нових методів діагностики фрактальних поверхонь.

Досліджувались ефективність та перспективи застосування кореляційно-оптичних методів контролю шорсткості поверхонь із негауссівською статистикою фрактальних поверхонь та поверхонь з нерівностями, більшими від довжини хвилі.

6.3.1.3. Рефлектометричний метод та метод дифузного розсіювання

Рефлектометричний метод базується на вимірюванні інтенсивностей падаючого на шорстку поверхню та дзеркально відбитого пучків. Цей метод добре працює для слабошорстких поверхонь, коли інтенсивність дзеркальної складової переважає інтенсивність дифузно відбитого пучка. Оптичне випромінювання, відбите шорсткою поверхнею складається з двох частин: дзеркально відбитої когерентної складової та розсіяної в усі боки некогерентної складової.

Скалярна теорія розсіювання шорсткою поверхнею дає співвідношення між інтенсивністю дзеркальної складової I_s , інтенсивністю сумарного відбитого випромінювання I_0 (що включає дзеркально та дифузно відбите випромінювання $I_0 = I_s + I_d$), середньоквадратичним відхиленням профілю від базової лінії σ та довжиною освітлюючої хвилі λ :

$$I_s/I_0 = e^{-(4\pi\sigma \cos \theta_0 / \lambda)^2}, \quad (6.3.3)$$

де θ_0 - кут падіння пучка на поверхню.

У рівнянні (6.3.3) вважається що σ мале в порівнянні з довжиною хвилі λ . Обговорення використання скалярної теорії розсіювання до інтерпретації результатів

застосування рефлектометричного методу проведено в огляді Дж. Елсона та співавторів. К. Карнігліа дещо пізніше застосував скалярну теорію, щоб описати розсіювання на діелектричних мультишарах.

Для дуже гладких поверхонь, коли відношення I_s / I_0 близьке до одиниці, доцільно вимірювати інтенсивність дифузно відбитого випромінювання. Тоді, для нормального падіння пучка та $\sigma \ll \lambda$, рівняння (2.3) перепишеться так:

$$\frac{I_d}{I_0} = \frac{(I_0 - I_s)}{I_0} = 1 - e^{-(4\pi\sigma/\lambda)^2} \approx \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2 \approx \frac{I_d}{I_s}, \quad (6.3.4)$$

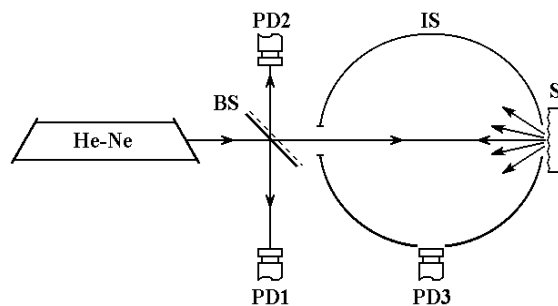


Рис. 6.3.1. Оптична схема для вимірювання дзеркального та дифузного розсіювання:

He-Ne - лазер; BS - світлоподільник;

IS - фотометрична куля;

вимірювань, 2 – для вимірювання дзеркальної складової, 3 – для вимірювання дифузного пучка. Отвір у фотометричній кулі IS повинен бути досить великим, щоб дзеркальна складова не віньєтувалася.

Для реалізації рефлектометричного методу та методу дифузного розсіювання як джерело випромінювання, як правило, використовуються лазери. Проте є прилади, які використовують вольфрамову лампу в діапазоні довжин хвиль від 400 нм до 1000 нм і дозволяють вимірювати коефіцієнти дифузного відбивання та пропускання на рівні 10^{-4} . Це дозволяє визначати σ в діапазоні 1-1000 Å.

6.3.1.4. Метод індикатриси

На відміну від рефлектометричного та дифузного методу, метод індикатриси розглядає стан поляризації падаючого та розсіяного пучків. У зарубіжній літературі

Для вимірювання дифузно відбитого випромінювання, як правило, використовується інтегральна сфера. На рис. 6.3.1 показано оптичну схему пристрою для визначення шорсткості поверхні з вимірювань дифузної та дзеркальної складових відбитого пучка.

У цій схемі діаметр пучка He-Ne-лазера складав 1 мм. Фотоприймач 1 використовується для нормування

цей метод називають angle-resolved scattering (ARS). Середньоквадратичне відхилення профілю від базової лінії повинно бути меншим від довжини хвилі λ .

Згідно з Елсоном, можна записати наступний вираз для індикатриси розсіювання:

$$\frac{1}{P_0} \frac{dP}{d\Omega} = \frac{16\pi^2}{\lambda^4} \cos\theta_0 \cos^2\theta |1 - \varepsilon|^2 \left(\frac{|\chi_\theta|^2}{|q' + q\varepsilon|^2} + \frac{|\chi_\phi|^2}{|q' + q_0|^2} \right) g(\bar{k} - \bar{k}_0), \quad (6.3.5)$$

де P_0 - потужність хвилі; $dP/d\Omega$ - потужність випромінювання, розсіяна в тілесному куті $d\Omega$; θ_0 - кут падіння; θ - кут розсіювання; ε - діелектрична постійна поверхні ($\varepsilon = \tilde{N}^2$, де $\tilde{N} = n - ik$ - комплексний показник заломлення); $g(\bar{k} - \bar{k}_0)$ - спектр потужності розсіяного випромінювання (power-spectral-density - PSD); \bar{k}_0 та \bar{k} - хвильові вектори падаючої та розсіяної хвилі, які визначаються:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta_0, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta, \quad (6.3.6)$$

$$q_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \cos\theta_0, \quad q = \frac{2\pi}{\lambda} \cos\theta, \quad (6.3.7)$$

$$q' = \left[\varepsilon \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 - k^2 \right]^{1/2}, \quad q'_0 = \left[\varepsilon \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 - k_0^2 \right]^{1/2}. \quad (6.3.8)$$

χ_θ та χ_ϕ вираховуються за допомогою рівнянь:

$$\chi_\theta = \frac{(q'q'_0 \cos\phi - kk_0\varepsilon)\cos\phi'}{q'_0 + q_0\varepsilon} + \frac{(2\pi/\lambda)q' \sin\phi \sin\phi'}{q'_0 + q_0}, \quad (6.3.9)$$

$$\chi_\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{q'_0 \sin\phi \cos\phi'}{q'_0 + q_0\varepsilon} - \frac{(2\pi/\lambda)\cos\phi \sin\phi'}{q'_0 + q_0} \right].$$

Тут ϕ - азимутальний кут розсіювання і ϕ' - кут падіння електричного вектора поля, виміряні відносно площини падіння.

Для розсіювання в площині падіння загальні рівняння спрощуються:

$$\chi_\theta = \frac{(q'q'_0 - kk_0)\cos\phi'}{q'_0 + q_0\varepsilon}, \quad \chi_\phi = -\frac{2\pi \sin\phi'}{\lambda q'_0 + q_0}, \quad (6.3.10)$$

вони дають p -поляризовані падаючий та розсіяний пучки, коли $\phi' = 0$, та s -поляризований падаючий та розсіяний пучки, коли $\phi' = \pi/2$.

Вищезгадані вирази припускають, що оптичні постійні однорідно розподілені по шорсткій поверхні. Рівняння (6.3.5) може бути розділене на дві частини, одна з яких залежить від відомих оптичних параметрів: довжини хвилі λ , кутів падіння θ_0 та розсіяння θ , оптичних постійних матеріалу ε , стану поляризації ϕ' падаючого та розсіяного променів. Від мікронерівностей поверхні залежить лише спектр потужності $g(\bar{k} - \bar{k}_0)$. Вимірювання індикатриси випромінювання, розсіяного шорсткою поверхнею, може бути проведено за допомогою системи DALLAS (detector array for laser light angular scattering), принципова схема якої зображена на рис. 6.3.2. Пучок лазерного випромінювання з круговою поляризацією, діаметром 2 мм - освітлює досліджувану поверхню.

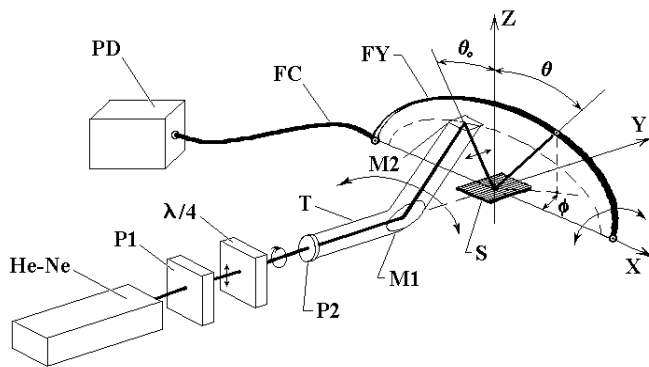


Рис. 6.3.2. Принципова схема системи DALLAS

Система з 87 збірних лінз розташована по периметру півкола. Апертура прийому кожної лінзи складає 6° .

Випромінювання, сфокусоване лінзою, передається на матрицю фотодіодів за допомогою скловолока. Сигнали з фотодіодів вводяться в

комп'ютер.

Поміряна, таким способом індикатриси розсіяння дозволяє розрахувати спектр потужності шорсткої поверхні. Однак конфігурація поверхні не може бути відновлена, тому що втрачається фазова інформація про особливості профілю поверхні. Фур'є-перетворення від спектра потужності дає автокореляційну функцію поверхні, максимум якої дорівнює середньоквадратичному відхиленню профілю від базової лінії.

Альтернативно, середньоквадратичне відхилення профілю від базової лінії може бути отримане шляхом інтегрування індикатриси розсіяння з наступним використанням рівняння (6.3.4).

6.3.1.5 Межі застосовності методів вимірювання шорсткості поверхні

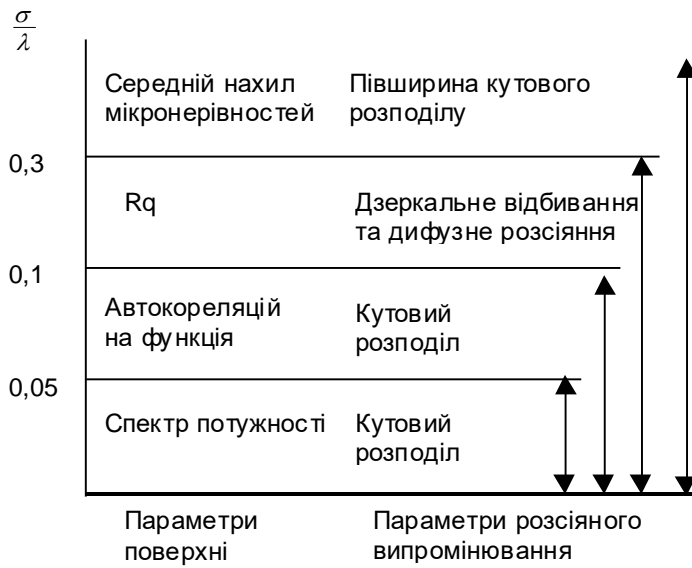


Рис. 6.3.3. Схема застосування оптичних методів для вимірювання параметрів поверхні різних пологих синусоїдальних профілів.

Схема на рис. 6.3.3 показує, які параметри поверхні та якими оптичними методами і в якому діапазоні висот можна визначити. Ця схема не повна. Вона не включає використання зворотного розсіювання, методів оптики спеклів і поляризаційних властивостей розсіяного випромінювання.

6.3.1.6. Кореляційно-оптичні методи діагностики шорстких поверхонь

Методи оптики спеклів

Існує значна кількість методів діагностики шорстких поверхонь, що базуються на використанні когерентних джерел випромінювання. Поле

Для практичного використання різних методів вимірювання шорсткості поверхонь необхідно підсумувати попередні експерименти з досліджень шорстких поверхонь і узагальнити їх, використовуючи формалізм Кірхгофа. Ефективність формалізму Кірхгофа підтверджена для згладжених поверхонь для

розсіяного когерентного випромінювання в цьому випадку має плямисту будову і називається спекл-полем. Контраст спекл-картини пов'язаний з дисперсією фази об'єкта. Проте в цьому випадку необхідно знати кількість неоднорідностей об'єкта,

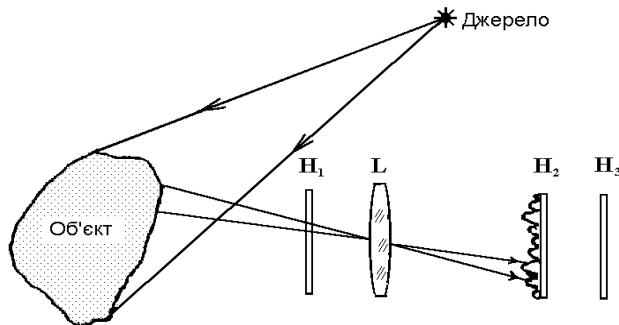


Рис. 6.3.4. Оптичне схема для отримання когерентного плямистого зображення

які беруть участь у формуванні спекл-картини, виконати процедуру сканування поля розсіяного випромінювання і провести комп'ютерну обробку результатів вимірювань. Параметри мікрорельєфу поверхні визначаються за допомогою схеми, зображеної на рис. 6.3.4.

Випромінювання когерентного джерела освітлює досліджуваний об'єкт. Лінза L формує когерентне зображення об'єкта в площині H_2 . По розподілу інтенсивності в зображенні об'єкта можна визначити параметри шорсткості.

Середній розмір спекла в зображенні складає приблизно $\lambda l/d_a$, де l - відстань між оптичною системою і площиною зображення, d_a - діаметр апертури оптичної системи. Відповідно до критерію Релея, мінімальний розмір ділянки поверхні, що розрізняється, дорівнює $\lambda l_0/d_a$, де l_0 - відстань між оптичною системою і поверхнею об'єкта. Чим нижча роздільна здатність системи, тим більший мінімальний розмір поля, що розрізняється, отже, більше число $N = \lambda l_0/d_a l_{\varphi_0}$ некорельованих елементів шорсткості приймають участь в формуванні зображення. Тут, l_{φ_0} - радіус кореляції шорсткої поверхні. В результаті, в площині зображення H_2 , додаються хвилі розсіяні різними елементами шорсткої поверхні, з випадковими початковими фазами. Отже, зображення стає плямистим. Плямистим поле буде і в довільній площині H_1 до оптичної системи чи після неї H_3 (див. рис. 6.3.4). Аналіз статистичних характеристик плямистого поля базується на методі випадкових незалежних вкладів, запропонованому в і гауссівській статистиці поля.

Якщо висота мікронерівностей шорсткої поверхні менша від довжини хвилі,

то контраст плямистої картини C ($C = \sqrt{\sigma_I^2} / \langle I(x, y) \rangle$, де $\sigma_I^2 = \langle I^2(x, y) \rangle - \langle I(x, y) \rangle^2$) практично лінійно залежить від дисперсії фази $\sigma_{\varphi_0}^2$ поверхні:

$$C \approx \frac{4\pi\sigma_{\varphi_0}^2}{\lambda^2 N}. \quad (6.3.11)$$

Для визначення $\sigma_{\varphi_0}^2$ по вимірюванню контрасту плямистого поля необхідна інформація про число незалежних вкладів N . N можна вирахувати з вимірювань радіуса кореляції поверхні l_{φ_0} . Коли радіус кореляції збігається з розмірами гаусівсового пучка, контраст спекл-картини максимальний.

Перспективними є методи діагностики шорсткості поверхні з дослідження кореляції між двома спекл-полями, отриманими для різних кутів падіння лазерного променя. Ці методи ефективні для висот 1-12 мкм, практично в реальному часі. Так, в одному з таких методів Легер та Перрін показали, що контраст спекл-картини, зареєстрованої на фотопластині двома експозиціями для двох кутів падіння променя на шорстку поверхню θ та $\theta + \Delta\theta$, дається співвідношенням:

$$C = \exp\left[-(k\Delta\theta \sin \theta)^2 \sigma_{\varphi_0}^2\right].$$

Опис шорсткої поверхні в рамках моделі випадкового фазового екрана

Шорстка поверхня з розподілом висот $h(\rho)$ (де ρ - двомірний вектор) у рамках моделі ВФЕ характеризується кореляційною функцією фази поверхні:

$$\Psi_{\Phi}(\rho) = \sigma_{\varphi_0}^2 K(\rho), \quad (6.3.12)$$

максимальне значення якої визначається дисперсією фази пропускаючого об'єкта $\sigma_{\varphi_0}^2$, а хід – коефіцієнтом кореляції $K(\rho)$. Півширина кореляційної функції дає радіус кореляції l_{φ_0} . З формули (6.3.12) можна перейти до кореляційної функції висот поверхні:

$$\Psi_h(\rho) = \sigma_h^2 K(\rho), \quad (6.3.13)$$

де $\sigma_h = \frac{\lambda}{2\pi(n-1)} \sigma_{\varphi_0}$ - середньоквадратичне відхилення профілю від базової лінії (Rq).

Модель ВФЕ базується на наступних припущеннях: у зоні реєстрації присутні всі просторові частоти поля розсіяного випромінювання; дисперсія фази об'єкта мала - $\sigma_{\varphi_0}^2 < 1$; радіус кореляції неоднорідностей більший за довжину хвилі, $l_{\varphi_0} > \lambda$.

Із моделі ВФЕ випливають наступні співвідношення між статистичними параметрами об'єкта та поля розсіяного випромінювання:

- дисперсія фази σ_{φ}^2 та амплітуди σ_A^2 поля в зоні Фраунгофера

$$\sigma_A^2 = \sigma_{\varphi}^2 = 0.5\sigma_{\varphi_0}^2, \quad (6.3.14)$$

- індекс мерехтіння (дисперсія інтенсивності) в зоні Фраунгофера

$$\beta_{\infty}^2 = 2\sigma_{\varphi_0}^2, \quad (6.3.15)$$

Поперечна функція когерентності поля не змінює в залежності від зони реєстрації, дорівнює поперечній функції когерентності граничного поля і визначається формулою:

$$\Gamma_{\perp}(\rho) = \exp\{\sigma_{\varphi_0}^2 [K_{\varphi_0}(\rho) - 1]\}, \quad (6.3.16)$$

Розглянуті співвідношення виконуються для гауссового розподілу нерівностей висот поверхні. Коли ж кількість нерівностей невелика або має місце відхилення закону їх розподілу від нормального, потрібно враховувати моменти вищих порядків як в структурі поверхні, так і в розподілі поля розсіяного нею випромінювання.

Третій та четвертий статистичні моменти розподілу нерівностей шорсткої поверхні визначають коефіцієнт асиметрії k_a та ексцесу k_k функції розподілу:

$$k_a = \frac{1}{\sigma_h^3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i^3, \quad (6.3.17)$$

$$k_k = \frac{1}{\sigma_h^2} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i^4. \quad (6.3.18)$$

6.3.2. Розсіювання оптичного випромінювання дисперсними середовищами

Розсіювання світла в дисперсних середовищах залежить від типу розсіюючих часток та відстані між ними. Розсіювання окремою часткою визначається її оптичними та геометричними параметрами: розміром, формою, внутрішньою будовою та іншим. У залежності від конкретних значень цих параметрів використовується та чи інша модель взаємодії оптичного випромінювання з розсіюючими частинками. Так, для однорідних сферичних частинок використовують формули Мі. Встановлено, що розсіювання ансамблем частинок залежить від їх концентрації. Коли відстань між частинками велика, порівняно з їх розміром, зміна концентрації не приведе до суттєвої зміни характеристик розсіяного випромінювання. В цьому випадку говорять про однократне розсіювання випромінювання. Істотне збільшення концентрації приведе до багатократного розсіювання.

У цьому параграфі розглядаються основні співвідношення, що описують розсіювання сферичними частинками, релеївське розсіювання, формули Мі, багатократне розсіювання. Таке світлорозсіювання відносять до традиційного (ТСР). Методи ТСР полягають у вимірюванні індикатриси розсіювання світла (залежності інтенсивності розсіювання від кута розсіювання). Поява лазерів привела до інтенсивного розвитку методів динамічного розсіювання світла (ДСР). Вони дозволяють по часових флуктуаціях інтенсивності розсіяного когерентного випромінювання досліджувати динамічні та структурні параметри світлорозсіюючого середовища.

6.3.2.1. Традиційний опис світлорозсіювання

Світлорозсіююча частинка повинна мати різку границю розділу між матеріалом частинки і навколишнім середовищем. Це забезпечується різними показниками заломлення частинки n_1 та середовища n_2 . Будемо вважати, що електричний вектор падаючого на частинку радіуса R світла з довжиною хвилі λ перпендикулярний до площини розсіювання. На відстані r реєструється випромінювання розсіяне під кутом θ тієї ж поляризації.

За величиною відношення R/λ можна виділити три типи розсіювання.

Релеївське розсіювання ($R/\lambda \ll 1$)

Інтенсивність I_R розсіювання світла ізольованою частинкою має розмір значно меншим від довжини хвилі:

$$I_R = \frac{16\pi^4 R^6 I_0}{r^2 \lambda^4} \left[\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2 + 2n_2^2} \right]^2, \quad (6.3.21)$$

де індекс R вказує на “релеївські” або точкові розсіювачі, а I_0 - інтенсивність падаючого пучка.

Зауважимо, що інтенсивність розсіювання I_R має такі особливості:

- не залежить від кута розсіювання;
- залежить від різниці показників заломлення $n_1 - n_2$ (залежність від абсолютного значення показника заломлення незначна);
- пропорційна R^6 , а отже амплітуда розсіяного поля $\sqrt{I_R}$ пропорційна поляризованості сфери;
- пропорційність λ^{-4} - це так званий закон розсіювання Релея.

Розсіювання Релея-Ганса-Дебая (РГД) ($(n_1 - n_2)R/\lambda \ll 1$)

У цьому випадку поле випромінювання, розсіяного однією частинкою, формується в результаті інтерференційного складання полів, розсіяних різними ділянками частинки. Це призводить до деякого відхилення індикатриси розсіювання РГД від релеївської I_R :

$$I_{RGD} = I_R \times P(\theta), \quad (6.3.22)$$

де $P(\theta)$ - фактор форми з властивостями $P(0) = 1$, $P(\theta) < 1$ для $\theta > 0$.

Для однорідних сфер, $P(\theta)$ набуває відносно простої форми:

$$P(\theta) = \left[3(\sin uR - uR \cos uR) / (uR)^3 \right]^2, \quad (6.3.23)$$

де

$$u = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (6.3.24)$$

так званий параметр розсіювання.

Розклад (6.3.5) за степенями uR дає:

$$P(\theta) = 1 - (uR)^2 / 5 + \dots, \quad (6.3.25)$$

і для частинок РГД довільної форми та будови :

$$P(\theta) = 1 - (uR_G)^2 / 3 + \dots, \quad (6.3.26)$$

де R_G - інерційний радіус частинки (для однорідної сфери $R_G = \sqrt{3/5}R$).

Розсіювання Мі ($(n_1 - n_2)R/\lambda \geq 1$)

Для великих частинок індикатриса розсіяного випромінювання стає дуже складною. Вона розраховується за допомогою законів геометричної оптики і враховує заломлення, поглинання, відбивання та перевідбивання променів всередині частинки. Отримано повні рішення такої задачі для діелектричних, металевих, багатошарових та інших сфер.

6.3.2.2 Однократне розсіювання системою частинок РГД

Для дисперсних середовищ з малою концентрацією частинок, виконуються умови однократного розсіювання випромінювання. Традиційні (некогерентні) методи світлорозсіювання в цьому випадку розглядають результуючу індикатрису розсіювання як суму парціальних індикатрис розсіювання незалежних частинок. Використання як джерела випромінювання лазера приведе до просторових та часових флуктуацій поля розсіяного випромінювання. Проте його усереднення приймаючим детектором в просторі та часі дасть результати, подібні до випадку з некогерентним джерелом.

Для системи, що складається з N ідентичних частинок, співвідношення (6.3.3) та (6.3.4) можна записати так:

$$I(\theta) = \frac{16\pi^4 R^6 N I_0}{r^2 \lambda^4} \left(\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2 + 2n_2^2} \right)^2 P(\theta). \quad (6.3.27)$$

Або у видозміненій формі:

$$I(\theta) = \frac{9\pi^2 V_S C M I_0}{r^2 \lambda^4 N_A} \left[\frac{1}{\rho} \left(\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2 + 2n_2^2} \right) \right]^2 P(\theta), \quad (6.3.28)$$

де V_S - розсіюючий об'єм, C - вагова концентрація частинок, M - молекулярна вага частинок, ρ - густина матеріалу частинок та N_A - число Авогадро.

Отже, вимірювання індикатриси світлорозсіювання суспензією дозволяє визначити їх молекулярну вагу. Решта параметрів відомі або можуть бути визначені простими методами. Якщо ж абсолютні вимірювання інтенсивності зробити важко, то за початковим нахилом $I(\theta)$ від u^2 , з рівнянь (6.3.6), (6.3.8) та (6.3.28), можна оцінити інерційний радіус частинок. Цей метод добре працює в діапазоні інерційних радіусів $200\text{Å} < R_G < 1000\text{Å}$.

Динамічне світлорозсіювання

Як вже зазначалося, розвиток ДСР прискорився одразу після відкриття лазеру. Розсіювання когерентного випромінювання призводить до утворення складного спекл-поля, утвореного в результаті складання парціальних когерентних сигналів із випадковими амплітудами та фазами. Рух частинок у потоці та броунівський рух викликає флуктуації інтенсивності розсіяного поля. Часові та просторові флуктуації інтенсивності поля розсіяного випромінювання залежать від розміру частинок та параметрів їх руху.

З 1970 р. динамічне розсіювання світла досліджувалась за допомогою спектроскопії кореляції фотонів. Високороздільна кореляційна техніка дозволяла записувати просторову, або часову кореляційну функцію розсіяного випромінювання $g(\mathcal{G})$, де \mathcal{G} - просторово-часовий аналог частоти. Для однократного розсіювання:

$$g(\tau) = \exp(-\tau/T_C), \quad (6.3.29)$$

де

$$T_C = \frac{1}{D_r u^2}, \quad (6.3.30)$$

вектор розсіювання u задається співвідношенням (6.3.6), а τ – часова кореляційна затримка. Коефіцієнт трансляційної дифузії частинки D_r задається співвідношенням Стокса –Ейнштейна:

$$D_r = \frac{KT}{6\pi\eta R_H}, \quad (6.3.31)$$

де K - константа Больцмана, T - температура Кельвіна, η - коефіцієнт динамічної в'язкості та R_H - гідродинамічний радіус частинки. В (6.3.29) T_C можна інтерпретувати як типові часові флуктуації спекл - картини на детекторі. Для субмікронних частинок типові значення u , T_C лежать в інтервалі мікросекунд та мілісекунд.

У цьому випадку по $g(\tau)$ динамічного світлорозсіювання (6.3.29) можна знайти півширину часових флуктуацій T_C . Оскільки u , T та η відомі величини, за допомогою (6.3.30) та (6.3.31) можна знайти гідродинамічний радіус частинок. У багатьох випадках відомо(існує) зв'язок R_H з реальним радіусом частинок R . Метод динамічного світлорозсіювання широко застосовується для визначення розмірів частинок у діапазоні від 20\AA до 1 мкм .

Дещо інші можливості дослідження поля розсіяного випромінювання дає теорія стохастичних та хаотичних коливань (див. розділ 1). В наступному параграфі розглянемо хаотичний рух броунівської частинки, в якому виявлено фрактальні властивості.

Система броунівський частинок

Броунівський рух пояснюють наявністю неврівноважених поштовхів молекул та атомів, які оточують броунівську частинку. В кожний момент часу рух броунівської частинки визначається рівнодіючою сил окремих атомів. Хаотичний рух атомів призводить до складного та неперервного руху броунівської частинки.

Процес броунівського руху це процес, який описує хаотичне переміщення зважених у рідині або газі дрібних частинок, внаслідок зіткнень із молекулами

середовища. Броунівський рух було відкрито в 1827 р. англійським ботаніком Робертом Броуном. Він помітив, що рух частинки не слабшає з часом і не залежить від хімічних властивостей середовища. Р. Броун першим зробив висновок, що неупорядкований рух мікроскопічних частинок пилку має фізичну, а не біологічну природу, як думали до нього. Тепловим флуктуаціям підлягають молекули, макромолекули, віруси, порошини й інші частинки, що знаходяться в русі за рахунок своєї теплової енергії. Фізична частинка речовини при відомій температурі несе середню кінетичну енергію, що виражається через постійну Больцмана. Інтенсивність броунівського руху збільшується з підвищенням температури середовища та зменшенням його в'язкості й розмірів частинок.

Послідовне пояснення броунівського руху дано А. Ейнштейном і М. Смолуховским у 1905-1906 рр. на основі молекулярно-кінетичної теорії. У результаті "бомбардування" молекулами броунівська частинка починає рухатися, змінюючи величину і напрямок своєї швидкості приблизно 10^{14} разів за секунду! Як відомо, середня кінетична енергія броунівських частинок не залежить від їх розміру й дорівнює $3/2 Kt$.

У наш час виявлено, що явище броунівського руху має більше значення, ніж це вважалось раніше. Воно відіграє принципову роль у формуванні спектрів коливань у генераторах будь-якої природи (електронних, напівпровідникових, лазерах). На мові броунівського руху можна глибше зрозуміти явище дифузії. Цікаві ефекти броунівського руху відкриті в біології. При фазових переходах, виявляється, існує броунівський рух параметрів порядку.

Спектроскопія оптичного змішування

Вперше метод оптичного детектування запропонував Г.С. Горелик в 1947 році. Експерименти Форрестера, Таунса, Каммінса, Пайка та інших стали основою нового напрямку в статистичній оптиці – спектроскопії оптичного змішування.

У спектроскопії з використанням дифракційної ґратки або інтерферометра вимірюється спектральна густина випромінювання, що виражається Фур'є-перетворенням кореляційної функції першого порядку електричного вектора розсіяного поля:

$$\Psi_R^{(1)}(\tau) = \langle E_R^*(R, t) E_R(R, t + \tau) \rangle. \quad (6.3.46)$$

Для повного опису статистичних властивостей поля випромінювання,

розсіяного брουνівськими частками потрібно досліджувати функції кореляції вищих порядків. Функцію кореляції інтенсивності розсіяного світла можна записати у вигляді:

$$\Psi_R^{(2)}(\tau) = \left\langle |E_R(R, t)|^2 |E_R(R, t + \tau)| \right\rangle. \quad (6.3.47)$$

Зручно ввести нормовані кореляційні функції (або коефіцієнти кореляції) першого і другого порядків :

$$K_R^{(1)}(\tau) = \frac{\Psi_R^{(1)}(\tau)}{\Psi_R^{(1)}(0)}, \quad K_R^{(2)}(\tau) = \frac{\Psi_R^{(2)}(\tau)}{[\Psi_R^{(1)}(0)]^2}. \quad (6.3.48)$$

Для визначення кореляційних функцій (6.3.46) та (6.3.47) використовують методи оптичного змішування, що по суті збігаються з методом биття, який застосовується у радіочастотній спектроскопії, але перенесені в оптичний діапазон. Існують різноманітні варіанти цього методу: одні засновані на принципі биття різних частот (гетеродинний метод), інші - на принципі самобиття (гомодинний метод).

Гетеродинна спектроскопія

У гетеродинному методі, схема якого подана на рис. 6.3.5, частоти розсіяного світла ω_R змішуються з частотою лазерного випромінювання або місцевого гетеродина ω_{MG} .

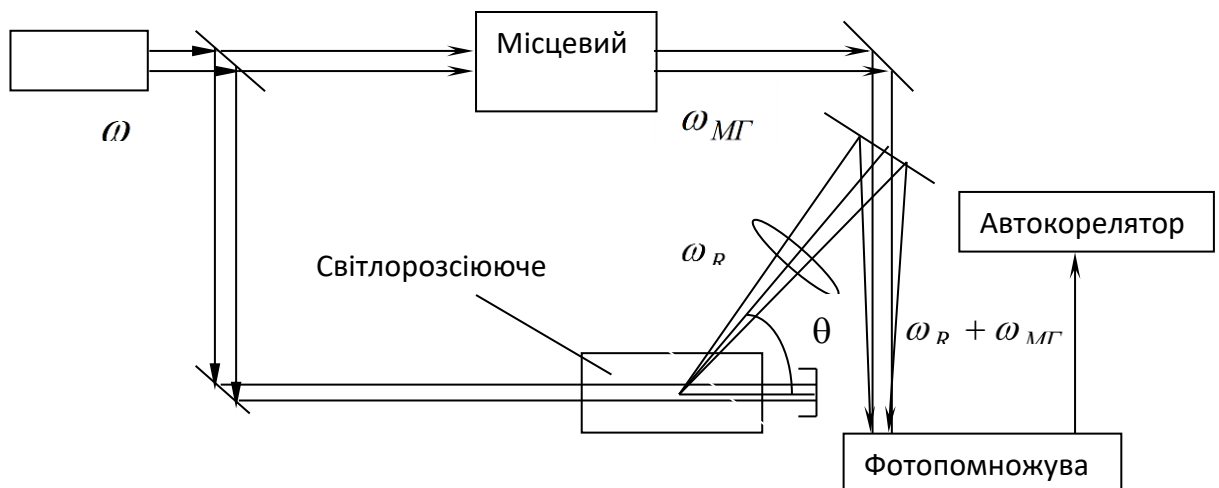


Рис. 6.3.5.Схема гетеродинної системи для дослідження розсіяного лазерного світла

Розглянемо функцію кореляції фотоструму:

$$\Psi_i(\tau) = \langle i(t)i(t+\tau) \rangle = e^2 q^2 \langle |E(t)|^2 |E(t+\tau)|^2 \rangle, \quad (6.3.49)$$

де $i(t) = e^2 q E^*(t)E(t)$ - миттєва густина фотоструму; e - заряд електрона; q - чутливість фотоприймача.

Кореляційну функцію фотоструму можна переписати у вигляді:

$$\Psi_i(\tau) = e^2 q \langle E^*(t)E(t) \rangle \delta(t) + e^2 q^2 \langle E^*(t)E(t)E^*(t+\tau)E(t+\tau) \rangle. \quad (6.3.50)$$

У гетеродинному методі на фотокатод діє поле розсіяного випромінювання $E_R(t)$ і поле місцевого гетеродина $E_{MG}(t)$. Отже, повне поле буде:

$$E(t) = E_R(t) + E_{MG}^0 \exp(-i\omega_{MG}t). \quad (6.3.51)$$

Для такого поля кореляційна функція фотоструму запишеться:

$$\Psi_i(\tau) = e i_{MG} \delta(\tau) + i_{MG}^2 + i_{MG} \langle i_R \rangle \left\{ K_R^{(1)}(\tau) \exp(i_{MG}t) + K_R^{(1)}(\tau)^* \exp(-i\omega_{MG}t) \right\}, \quad (6.3.52)$$

де припускається, що $i_{MG} \gg \langle i_R \rangle$.

Лазерний пучок із частотою ω ділиться на два пучки, один з яких (з частотою ω_R), розсіюється в середовищі під кутом θ , а інший - керує коливаннями місцевого гетеродина (з частотою ω_{MG}). Пучки з частотами ω_R та ω_{MG} змішуються на катоді фотопомножувача, струм з якого потрапляє в автокорелятор.

Якщо вважати, що:

$$K_R^{(1)}(\tau) = \exp(-i\omega_R\tau) \exp(-\Gamma|\tau|), \quad (6.3.53)$$

то відповідно до теореми Вінера – Хінчина, одержуємо вираз для спектральної густини фотоструму:

$$S_i(\omega) = \pi^{-1} e i_{MG}^2 + i_{MG}^2 \delta(\omega) + i_{MG} \langle i_R \rangle \frac{2\Gamma/\pi}{(\omega - |\omega_R - \omega_{MG}|)^2 + \Gamma^2}. \quad (6.3.54)$$

Отже, у гетеродинному методі спектр має лорентцівську форму з півшириною $\Delta\omega_{1/2} = \Gamma$ та центром на частоті $\omega = \omega_R - \omega_{MG}$.

Повертаючись до рівності (6.3.52), переконуємося, що в гетеродинному методі вимірюється кореляційна функція першого порядку:

$$\Psi_R^{(1)}(\tau) = k_R^{(1)}(\tau) \langle i_R \rangle / e q, \quad (6.3.55)$$

незалежно від типу статистики поля. Тому в гетеродинній спектроскопії

визначається та саме кореляційна функція, що й у звичайній спектроскопії, але для значно повільніших процесів розсіювання.

Гомодинна спектроскопія

При використанні гомодинного методу на фотокатод потрапляє тільки розсіяне світло (рис. 4.2). Тому, якщо у рівняння (6.3.49) підставити функцію кореляції другого порядку (6.3.47), отримаємо:

$$\Psi_i(\tau) = e\langle i_R \rangle \delta(\tau) + \langle i_R \rangle^2 K_R^{(2)}(\tau). \quad (6.3.56)$$

У загальному випадку співвідношення між функціями $K_R^{(1)}(\tau)$ і $K_R^{(2)}(\tau)$ залежить від типу статистики i , зокрема, для розподілу Гаусса записується:

$$K_R^{(2)}(\tau) = 1 + \left| K_R^{(1)}(\tau) \right|^2. \quad (6.3.57)$$

Якщо нормована кореляційна функція поля має вигляд (6.3.53), то спектральна густина фотоструму буде:

$$S_i(\omega) = \frac{e\langle i_R \rangle}{2\pi} + \langle i_R \rangle^2 \delta(\omega) + \langle i_R \rangle^2 \frac{2\Gamma/\pi}{\omega^2 + (2\Gamma)^2}. \quad (6.3.58)$$

Отже, маємо лоренцівський контур із півшириною $\Delta\omega_{1/2} = 2\Gamma$, симетричний відносно $\omega = 0$.

У загальному випадку кореляційні функції фотоструму, що визначаються в гомодинному та гетеродинному методах, відрізняються. Хоч при відсутності направленої руху в середовищі вони дають практично однакову спектральну інформацію. Якщо ж у розсіюючому середовищі є течії, то їх швидкість можна визначити лише гетеродинним методом.

Розсіяне світло фокусується на фотокатоді помножувача, викликаючи миттєві фотоструми, що виявляються у вигляді флуктуації числа фотоелектронів. Цей сигнал потрапляє в автокорелятор, що розраховує функцію часової кореляції інтенсивності розсіяного світла.

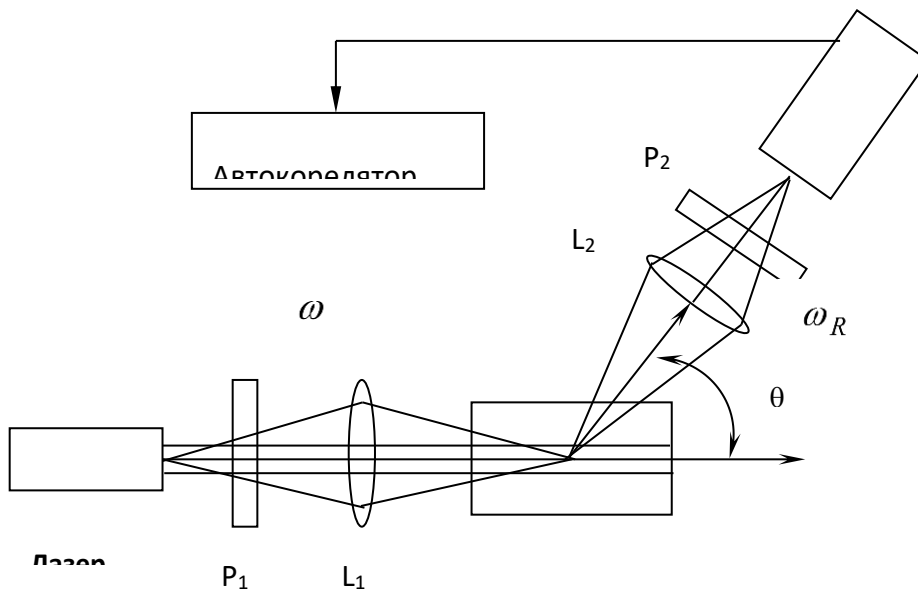


Рис. 6.3.6.1.Схема гомодинної системи

Розсіювання світла на броунівських частинках

Розглянемо середовище об'ємом V , що містить N розсіюючих центрів. Електричне поле в точці R , розсіяне на центрі в точці (r_p, t) , можна записати:

$$E_R(r_p, t) = A(\Gamma_p, t) \exp\{i(u \cdot r_p^t - \omega t)\}, \quad (6.3.59)$$

де $A(\Gamma_p, t)$ - амплітуда, що залежить від геометрії і поляризації поля випромінювання, а також від структури і конфігурації розсіюючого центра, $\Gamma_p = (\Omega, r)$, а

$$u = |k - k_R| = \frac{4\pi}{\lambda} n \sin \frac{\theta}{2}, \quad (6.3.60)$$

де n - показник заломлення розчинника.

Лазерне випромінювання з поляризацією e , хвильовим вектором k і частотою ω падає на розсіююче середовище. Розсіяне світло з поляризацією e_R , хвильовим вектором k_R і частотою ω_R спостерігається під кутом θ до напрямку падаючої хвилі за допомогою приймача.

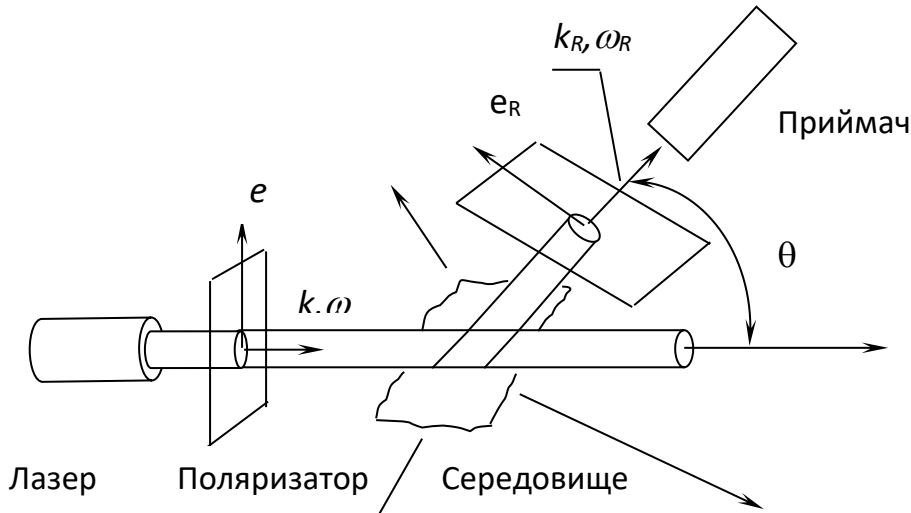


Рис. 6.3.7. Схема спостереження розсіяного випромінювання

Повне електричне поле в точці (R, t) дорівнює:

$$E_R(R, t) = \sum_{p=1}^N E_R(r_p, t), \quad (6.3.61)$$

і кореляційна функція поля має вигляд:

$$\Psi_R^{(1)}(u, t) = \exp(-i\omega t) \left\langle \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N A^*(\Gamma_p^0, 0) \cdot A(\Gamma_q^t, t) \exp(-iur_p^0) \exp(iur_q^t) \right\rangle. \quad (6.3.62)$$

Будемо вважати, для простоти, що амплітуди поля не залежать від конфігурації (Ω, r) розсіюючих центрів. Тоді рівняння набуде вигляду:

$$\Psi_R^{(1)}(u, t) = N \langle |A|^2 \rangle F(u, t) \exp(i\omega t), \quad (6.3.63)$$

де введена проміжна функція для розсіювання світла,

$$F(u, t) = N^{-1} \left\langle \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \exp(-iur_p^0) \exp(iur_q^t) \right\rangle, \quad (6.3.64)$$

взята з теорії розсіювання нейтронів.

Використовуючи метод Ван Хова, було знайдено:

$$F(u, t) = F_s(u, t) + F_c(u, t), \quad (6.3.65)$$

де (6.3.66)

$$F_s(u, t) = N^{-1} \left\langle \sum_{p=1}^N \exp[iu(r_p^t - r_p^0)] \right\rangle$$

визначає автокореляційну частину, що описує некогерентне розсіювання, а

$$F_c(u, t) = N^{-1} \left\langle \sum_{p=1}^N \sum_{q \neq p}^N \exp[iu(r_q^t - r_p^0)] \right\rangle \quad (6.3.67)$$

задає взаємно кореляційну частину, пов'язану з когерентним розсіюванням.

Некогерентне розсіювання

Функцію (6.3.66) можна записати:

$$F_s(u, t) = \int \exp(iu\Delta r_t) G_s(r, t) dr, \quad (6.3.68)$$

де $G_s(r, t)$ - автокореляційна функція Ван Хова, а миттєвий зсув частинки в часі дорівнює:

$$\Delta r_t = r^t - r^0 = \int_0^t v(t') dt', \quad (6.3.69)$$

де $v(t)$ - миттєва швидкість розсіюючої частинки.

Для моделі вільної трансляційної дифузії маємо:

$$G_s(r, t) = (4\pi D_T t)^{-3/2} \exp\left(-\frac{r^2}{4D_T t}\right) \quad (6.3.70)$$

і для середнього квадрата зсуву частинки (6.3.69) одержуємо відому формулу Ейнштейна - Смолуховського:

$$\langle (\Delta r_t)^2 \rangle = 6D_T t. \quad (6.3.71)$$

Для гауссового розподілу у вигляді (6.3.70) функція кореляції (6.3.68) набуває вигляду:

$$F_s(u, t) = \exp(-u^2 D_T t), \quad (6.3.72)$$

або з урахуванням співвідношення (6.3.71):

$$F_s(u, t) = \exp\left[-\frac{1}{6} u^2 \langle |\Delta r_t|^2 \rangle\right] \quad (6.3.73)$$

Для гауссового розподілу (6.3.72) спектральна густина некогерентно розсіяного випромінювання дорівнює:

$$S(u, \omega) = N|A|^2 \frac{u^2 D_T / \pi}{(\omega_R - \omega)^2 + (D_T u^2)^2} \quad (6.3.74)$$

Цей вираз описує лоренцівський контур із півшириною $\Delta\omega_{1/2} = u^2 D_T$ і центром при $\omega = \omega_R$.

Згідно з (6.3.57) та (6.3.72) для гауссового розподілу маємо:

$$K_R^{(2)}(t) = 1 + \exp(-2u^2 D_T t). \quad (6.3.75)$$

Вимірюючи кут нахилу прямої $\ln[K_R^{(2)}(t) - 1]$ (у лінійному наближенні) до осі t , знаходимо значення коефіцієнта дифузії.

Когерентне розсіювання

Якщо броунівські частинки взаємодіють одна з одною, то функцію (6.3.67) можна записати:

$$F_c(u, t) = \frac{\rho}{V} \iint \exp[iu(r_q^t - r_p^0)] G_c(r_q^t, r_p^0, t) dr_q^t dr_p^0, \quad (6.3.76)$$

де $G_c(r_q^t, r_p^0, t)$ - функція Ван Хова, взаємної кореляції двох різних частинок.

Оскільки нам не відомий аналітичний вигляд функції Ван Хова, скористаємося наближенням Віньярда:

$$G_c(r_q^t, r_p^0, t) = \int g^{(2)}(r_q^0, r_p^0) G_s(r_q^t, r_p^0, t) dr_p^0, \quad (6.3.77)$$

що дозволяє привести функцію (6.3.76) для когерентного розсіювання до простого вигляду:

$$F(u, t) = G(u) F_s(u, t), \quad (6.3.78)$$

де: $F_s(u, t)$ задана формулами (6.3.728) або (6.3.73), а $G(u)$ - функція Цернике і Принса.

Підставляючи (6.3.78) у (6.3.65), отримуємо:

$$F(u, t) = [1 + G(u)] F_s(u, t) = F(u, 0) F_s(u, t), \quad (6.3.79)$$

звідки випливає, що врахування взаємодії частинок відповідно до моделі Віньярда не змінює часової залежності функції кореляції. Це означає, що в наближенні Віньярда взаємодія частинок впливає тільки на інтенсивність спектральної лінії і не змінює її форму, визначену (6.3.74).

Функція кореляції другого порядку

Функцію кореляції другого порядку для інтенсивності розсіяного світла можна записати у вигляді:

$$K_R^{(2)}(u, t) = N^2 \langle |A|^2 \rangle F^{(2)}(u, t), \quad (6.3.80)$$

де введена проміжна функція другого порядку :

$$F^{(2)}(u, t) = N^{-2} \left\langle \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N \exp[-iu(r_p^0 - r_q^0 + r_r^t - r_s^t)] \right\rangle. \quad (6.3.81)$$

Розглянемо цю функцію у випадку частинок, положення яких статистично незалежні. Тоді тільки три складові, для яких $p = q = r = s$, $p = q \neq r = s$ та $p = s \neq q = r$ відмінні від нуля. Інші доданки дорівнюють нулю, оскільки вони містять інтерференційні множники типу $\exp(iur_t)$ або $\exp[iu(r_t + r_0)]$, що зрівнюються з нулем при усередненні з функцією розподілу, останнє залежить тільки від модуля $|r_t - r_0|$. Отже, функція зводиться до вигляду:

$$F_s^{(2)}(u, t) = 1 + (1 - N^{-1}) |F_s(u, t)|^2. \quad (6.3.82)$$

Якщо прийняти модель трансляційної дифузії частинок, для якої функція $F_s(u, t)$ має вигляд (6.3.72), то очевидно, що функція (6.3.82) відрізняється від результату (6.3.75) складовою, пропорційною N^{-1} . Це так звана негауссівська поправка, що прямує до нуля при $N \rightarrow \infty$. Тому для великої кількості частинок знаходимо:

$$F_s^{(2)}(u, t) = 1 + |F_s(u, t)|^2, \quad (6.3.83)$$

що збігається з (6.3.75) у випадку гаусівського процесу.

Звичайно, повний аналіз функції (6.3.81) потребує врахування взаємодії між частинками, а також врахування флуктуації кількості частинок у часі.

Рекомендована література

1. Розум Т. В. Репрографія і спеціальні види друку: Ч. 1: Репрографія. Навчальний посібник. – К.: НТУУ «КПІ», 2006. – 120 с.
2. Ванников А.В., Уарова Р.М. Электрография: Учебное пособие. М.: МГУП, 2000. 127 с.
3. Киппхан Г. Энциклопедия по печатным средствам информации. Технологии и способы производства: пер. с нем. / Г. Киппхан. – М.: МГУП, 2003. – 1280 с.
4. Уарова Р.М., Ванников А.В., Чуркин А.В. Основы цифровой печати. Учебное пособие – М.: МГУП, 2005.- 448 с.
5. Ангельський О.В., Максимяк П.П. "Комп'ютерне та фізичне моделювання розсіювання світла неоднорідними об'єктами" Чернівці, "ЧНУ", 2017.-332 с .
6. Хайди Толивер-Нигро, Технологии печати. – М.: ПРИНТ-МЕДИА центр, 2006. - 224 с.
7. ГОСТ 13.0.002-84 Репрография. Термины и определения. - М.: Изд-во стандартов. - 1988. - 28 с.
8. Кохановський В.О. Вимірювальні прилади в поліграфічному процесі.(Метод. вказ. до викон. лаб. роб.) – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 38 с.
9. Віхоть О.М. Копіювально-розмножувальна техніка. (Метод. вказ. до практ. занять.) – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – 24 с.
10. Дудяк В.О. та інші Властивості світлочутливих систем та технологій фотореєстраційних процесів. Навчально-методичний посібник - Львів, 2009. – 64 с.