

Глава 2. Обладнання

Інструментальний дизайн

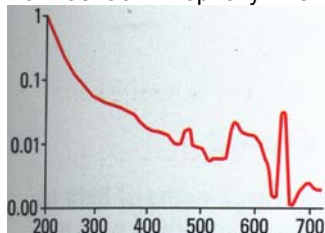
Компоненти

Спектрофотометр – це прилад для вимірювання пропускання або поглинання зразка як функції довжини хвилі електромагнітного випромінювання. Ключові компоненти спектрофотометра такі: [8]

- джерело, що генерує широку смугу електромагнітного випромінювання
 - дисперсійний пристрій, що вибирає з широкої смуги випромінювання джерела особливу довжину хвилі (або, коректніше, смугу хвилі)
 - зона зразка
 - один чи більше детекторів для вимірювання інтенсивності випромінювання
- Інші оптичні компоненти – лінзи та дзеркала – пропускають світло через прилад.

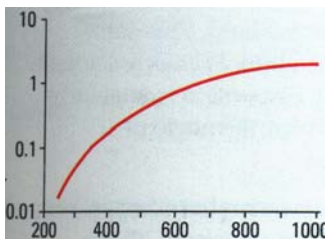
Джерела

Ідеальне джерело світла дає сталу інтенсивність при всіх довжинах хвилі з низьким шумом і довготерміновою стабільністю. На жаль, однак, такого джерела не існує. В УФ-видимих СФ звичайно застосовуються два джерела. Перше – це дейтерієва дугова лампа. Вона забезпечує хорошу нескінченність (континуум) інтенсивності в УФ області і корисну інтенсивність у видимій області (див.рис.16).

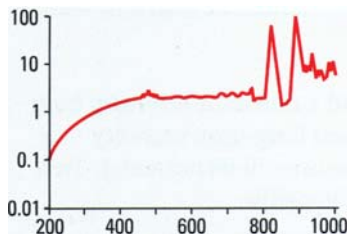


Хоча сучасні дейтерієві лампи мають малий шум, цей шум часто буває лімітуючим фактором у всьому шумі приладу. З часом, інтенсивність світла від такої лампи поступово зменшується. Типово, така лампа має період напівжиття (час, необхідний для зменшення інтенсивності на половину від його вихідного значення) прибіл. 1,000 год.

Друге джерело – вольфрамогалогенова лампа (див.рис.17) забезпечує хорошу інтенсивність в частині УФ спектра і у всій видимій області. Цей тип лампи має дуже низький шум і низький самоплив (дрейф) і типово придатний протягом 10.000 год.



Більшість СФ для вимірювання УФ-видимої області мають обидва типи ламп. В таких приладах або ж використовують перемикач між двома лампами, або ж світло від двох джерел змішують для одержання одного джерела з широкою смугою.



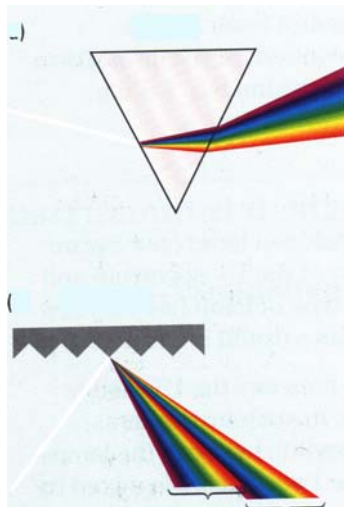
Альтернативне джерело світла – ксенонова лампа (див.рис.18), яка дає хорошу нескінченність уздовж усієї УФ та видимої області. Але через те, що шум від ксенонових ламп значно менший, ніж від дейтерієвих чи вольфрамових, вони знаходять застосування лише в тих випадках, де головний інтерес становить висока інтенсивність, наприклад, при вимірюванні дифузного відбиття.

Дисперсійні пристрої

Дисперсійні пристрої (dispersion devices) зумовлюють різні довжини хвиль світла, що розсіюється в різних кутах. При об'єднанні з відповідною вихідною щілиною, ці пристрої можна застосовувати для вибору

індивідуальної (особливої) довжини хвилі (чи, точніше, вузької смуги хвилі) світла від безперервного джерела. В УФ-видимих СФ взагалі вживаються два типи дисперсійних пристроїв – призми та голографічні решітки.

Призма генерує веселку від сонячного світла. Цей же принцип використовується і в СФ. Призми прості й дешеві, але дисперсія кутово нелінійна (див.рис.19а). Крім того, кут розсіювання чутливий до температури. З цих причин, більшість сучасних СФ замість призми мають голографічні решітки. Ці пристрої виготовлені із скла і мають вузькі заглибини.



Традиційно, вони виготовлялись механічно, але сучасні методи виробництва застосовують голографічний оптичний процес.

Розмір заглибини того ж порядку, що й довжина хвилі світла, що розсіюється. Щоб одержати джерело відбиття, наноситься алюмінієве покриття. Світло, що падає на решітку, відбивається в різних кутах, в залежності від довжини хвилі. Голографічні решітки дають лінійне кутове розсіювання з довжиною хвилі і нечутливі до температури. Однак, вони відбивають світло в різних порядках (різній послідовності), які перекриваються. Для забезпечення того, щоб лише світло бажаного порядку відбиття досягало детектора, необхідно застосовувати фільтри. Увігнута решітка розсіює і фокусує світло одночасно.

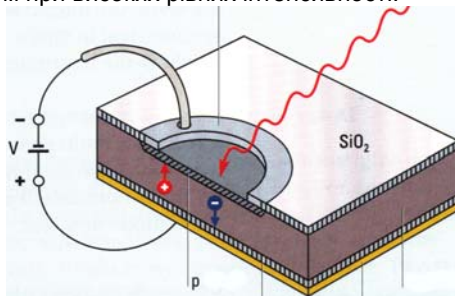
Монохроматор складається із вхідної щілини, дисперсійного пристрою та вихідної щілини. В ідеалі, продукт виходу з монохроматора – це монохроматичне світло, однак, на практиці – це завжди смуга, оптимально симетрична по формі. Ширина смуги при половині її висоти є інструментальною шириною смуги (ІШС).

Детектори

Детектор перетворює світловий сигнал в електричний. В ідеалі, він повинен давати лінійний відгук (реакцію) в широкому діапазоні з низьким шумом і високою чутливістю. СФ взагалі мають детектор з фотопомножувачем або ж фотодіодний детектор.



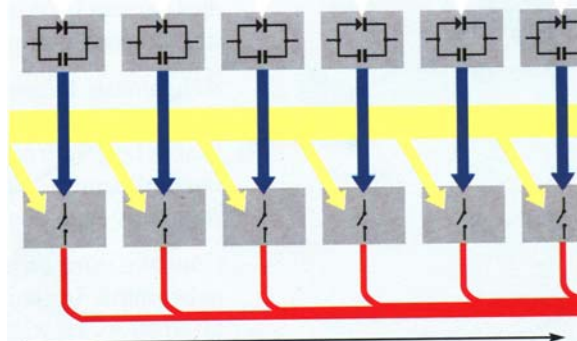
Фотопомножувач (див. рис.20) об'єднує перетворення сигналу з декількома ступенями підсилення всередині трубки. Спектральну чутливість визначає природа катодного матеріалу. Простий фотопомножувач забезпечує хорошу чутливість в усій УФ-видимій області. Цей тип детектора забезпечує високу чутливість при низьких рівнях світла. Однак, при аналітичному застосуванні спектроскопії висока чутливість асоціюється з низькими концентраціями, що призводить до низького поглинання, а це, в свою чергу, дає високі рівні інтенсивності. Щоб відчувати надзвичайно малу різницю при вимірюванні в сліпому досліді і вимірюванні зразка, детектор повинен мати низький шум при високих рівнях інтенсивності.



Останнім часом все частіше в якості детекторів у СФ використовуються фотодіоди (див.рис.21). Фотодіодні детектори мають ширший динамічний діапазон і, як пристрої у твердому стані, більш надійні, ніж детектори з фотопомножувачем. У фотодіоді світло, що падає на напівпровідниковий матеріал, дозволяє електронам

проходити крізь нього, зменшуючи, таким чином, заряд у приймачі ? (capacitor), що з'єднаний з напівпровідником. Кількість заряду, необхідна для перезарядження приймача при регулярних інтервалах, пропорційна інтенсивності світла. Перші фотодіоди мали низьку чутливість в малому УФ-інтервалі, але в сучасних детекторах ця проблема вирішена. Рівень визначення (детектування) для детекторів на основі силіцію становить прибіл. 170-1100 нм.

Деякі сучасні СФ замість одного детектора мають набір (array) фотодіодних детекторів. Цей набір складається з ряду фотодіодних детекторів, розташованих поруч на силіцієвому кристалі. Кожний діод має відповідний приймач і приєднаний до загальної лінії виходу за допомогою твердофазного перемикача. Перемикачі контролюються реєструючим приладом (див.рис.22).



Спочатку приймачі заряджуються до специфічного рівня. Коли фотони проникають через силіцій, генеруються вільні носії електричного заряду, які розряджують приймачі. Приймачі розряджуються при регулярних інтервалах, які забезпечують період вимірювання для кожного циклу.

Кількість заряду, необхідна для перезарядження приймачів, пропорційна числу фотонів, що вимірюються кожним діодом, яке, в свою чергу, пропорційне інтенсивності світла. Спектр поглинання одержують вимірюванням змін інтенсивності світла у всьому діапазоні довжин хвиль. Набір типово включає від 200 до 1000 елементів, в залежності від приладу і мети його використання. Наприклад, діодний набір у СФ марки HP 8453 включає 1024 детекторних елементи, а фоточутлива область вимірює прибіл. 25 x 0.5 мм. Цикл виходу даних, який відповідає часу розповсюдження світла (illumination time), становить 100 хв.

Технологія виготовлення набору фотодіодів подібна до мікропроцесорної технології. Набір фотодіодів – це складні пристрої, але, оскільки вони у твердому стані, дають високу надійність.

Оптитехніка

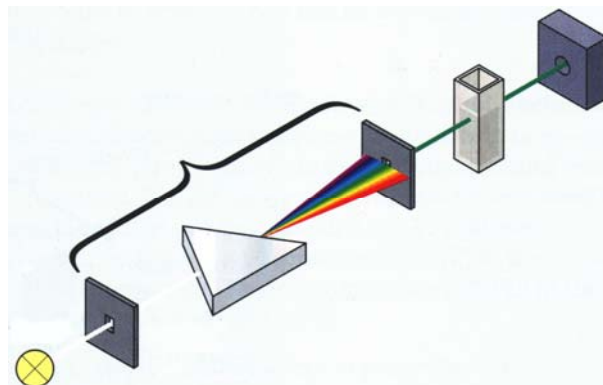
Для передачі та фокусування світла у СФ застосовуються лінзи або увігнуті зеркала. Прості лінзи дешеві, але потерпають від хроматичної аберації, тобто, світло різних довжин хвиль не фокусується в одній і тій же точці простору. Але при хорошому (старанному – careful) проектуванні хроматична аберація окремих лінз в оптичній системі може бути використана для взаємного погашення, і з цими простими і дешевими компонентами може бути сконструйована ефективна оптична система.

Ахроматичні лінзи об'єднують багаторазові (multiple) лінзи з різного скла і з різними коефіцієнтами рефракції в одну складну лінзу, яка майже не зазнає хроматичної аберації. Такі лінзи застосовуються в камерах. Вони забезпечують хорошу продуктивність, але досить дорогі. Увігнуті зеркала значно дешевші і порівняно вільні від впливу хроматичної аберації. Однак, алюмінієва поверхня легко кородує, що призводить до втрати ефективності.

На кожній оптичній поверхні, включаючи поверхні між компонентами ахроматичної лінзи, втрачається 5-10% світла через поглинання чи відбиття. Таким чином, СФ повинні проектуватися ідеально, з мінімальною кількістю оптичних поверхонь.

Традиційний спектрофотометр

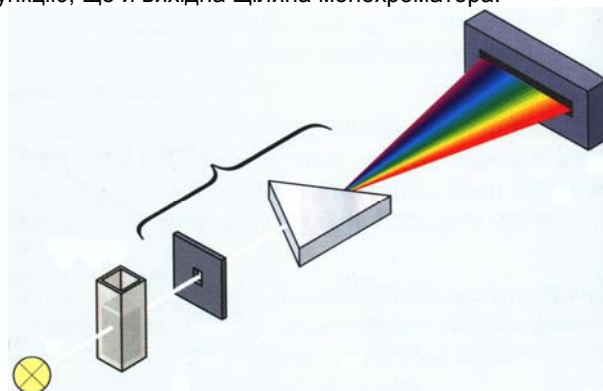
На рис.23 показана схема традиційного однопроменевого СФ. Поліхроматичне світло від джерела фокусується на вхідну щілину монохроматора, який вибірково передає вузьку смугу світла. Це світло потім проходить через поверхню зразка до детектора. Поглинання зразка визначають вимірюванням інтенсивності світла, що досягло детектора без зразка (сліпого досліду), і порівнянням з інтенсивністю світла, що досягло детектора після проходження через зразок. Як уже зазначалося, більшість СФ мають дві лампи джерела – дейтерієву і вольфрамову - і в них в якості детекторів застосовують або фотопомножувальні трубки, або фотодіоди.



Цей дизайн добре підходить для вимірювання поглинання в одній точці спектра. Але він менш придатний для вимірювання різних сполук при різних довжинах хвилі або для одержання спектрів зразків. Для виконання таких завдань із використанням традиційного СФ частини монохроматора повинні обертатися, що породжує проблему механічної невідтворюваності результатів. Крім того, одержання серії даних – досить повільний процес.

Спектрофотометр з діодним пристроєм

На рис.24 показана схематична діаграма СФ з діодним пристроєм (array). Поліхроматичне світло від джерела проходить через зразок і фокусується на вхідну щілину поліхроматора. Поліхроматор диспергує світло на діодний пристрій (пластинку), на якому кожний діод вимірює вузьку смугу спектра. Ширина смуги світла, що вимірюється діодом, співвідноситься з розміром вхідної щілини поліхроматора і з розміром діода. Кожний діод виконує ту ж функцію, що й вихідна щілина монохроматора.



Поліхроматор (вхідна щілина плюс дисперсійний пристрій) і діодний пристрій знаходяться у вузлі, відомому як спектрограф. Оскільки відносні положення зразка і дисперсійного елемента тут зберігаються порівняно із традиційним приладом, ця конфігурація часто має перевагу.

Щоб звести до мінімуму можливі фотохімічні реакції, використовують пристрій для блокування світла від джерела поки буде розпочате вимірювання. Коли вимірювання починається, пристрій автоматично відкривається, світло проходить через зразок до діодної пластинки. Різниця в інтенсивності світла, що досягло детектора із зразком і без зразка, вимірюється, як описано вище.

Такий СФ дуже швидкий у роботі завдяки паралельному запису даних і здатності електронного сканування, має чудову відтворюваність довжини хвиль і дуже надійний.

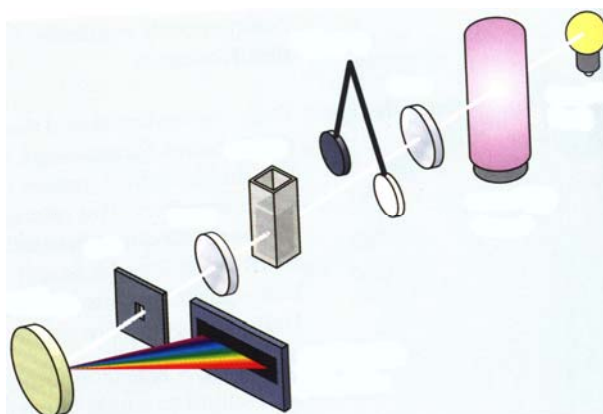
Конфігурація

Існують різні види спектрофотометрів. Кожен з них має свої переваги і недоліки.

Однопроменевий дизайн

Обидва СФ – традиційний та з діодним пристроєм – однопроменеві. Такі прилади дешеві, проста оптична система забезпечує високу чутливість. Еталонні СФ, що використовуються інститутами національних стандартів, такими як Національний Інститут Стандартів і Технології в Сполучених Штатах та Національна Фізична Лабораторія у Великій Британії – однопроменеві.

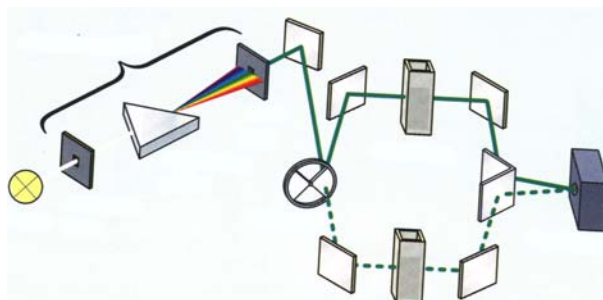
Зокрема, СФ з діодним пристроєм добре підходять для однопроменевої конфігурації, оскільки спектри одержуються дуже швидко, а часовий інтервал між вимірюванням сліпого дослідження і зразка мінімальний. Крім того, може бути використаний внутрішній еталон для зменшення в подальшому ефектів від джерел.



На рис.25 показана оптична система сучасного СФ з діодним пристроєм HP 8453. Ця однопроменева конфігурація має мінімальну кількість оптичних компонентів і діодну пластинку з 1024 елементів для вимірювання довжини хвиль в діапазоні 190-1100 нм з хорошою роздільною здатністю.

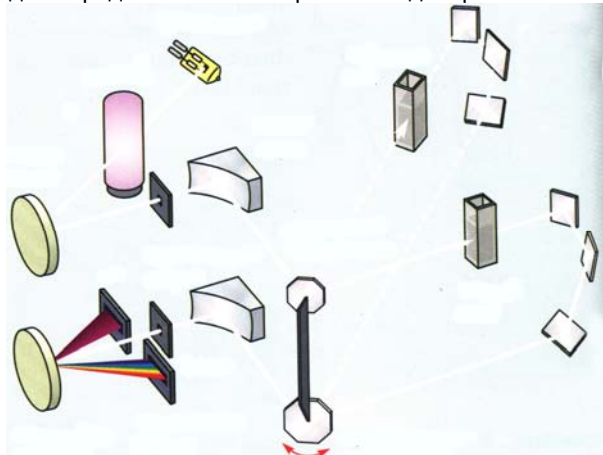
Двопроменевий дизайн

У традиційному однопроменевому СФ вимірювання сліпого досліді і зразка проводяться послідовно з інтервалом у декілька секунд - для виміру однієї довжини хвилі і до декількох хвилин – для виміру повного спектра. Зміна інтенсивності джерела (дрейф) може спричинити значні помилки при великих інтервалах часу. Щоб подолати цю проблему, було сконструйовано двопроменевий СФ. У цій конфігурації на оптичну доріжку поблизу джерела світла ставиться переривач. Він обертається так, що альтернативні вимірювання сліпого досліді і зразка відбуваються декілька раз на секунду і таким чином одержується поправка на дрейф джерела світла.



На рис. 26 показана схема двопроменевого СФ. В порівнянні з однопроменевими ці прилади мають більше оптичних компонентів, що зменшує чутливість. Для підвищення чутливості необхідно більше часу для вимірювання. До того ж, через складний механічний дизайн таких приладів вони можуть бути менш надійними.

Традиційно, важливим фактором при дизайні СФ була висока стабільність двопроменевих приладів. Однак, останні досягнення в електроніці покращили стабільність однопроменевого СФ і призвели до зміни в його конфігурації. Однопроменеві СФ забезпечують більш високу чутливість і простіші в застосуванні, з дрейфом, що лише на один-два порядки менший в порівнянні з двопроменевими приладами.



Перший комерційний СФ з діодним пристроєм HP 8450A мав багатопроменевий дизайн (див.рис.27). В ньому застосовується спрямовувач, який спрямовує промінь на еталонну позицію і не менш як на 4 позиції зразка (для спрощення на рисунку показана лише одна позиція).

Дизайн із розщепленим променем

Такий СФ (рис.28.) подібний до двопроменевого, але замість переривача світла тут застосовується розщеплювач, який посилає світло на два окремі, але ідентичні детектори. Ця конфігурація дозволяє проводити вимірювання сліпого досліду і зразка одночасно. Хоча така конфігурація механічно простіша, ніж двопроменева, і потребує менше оптичних елементів, застосування двох незалежних детекторів може бути ще однією причиною дрейфу. Цей дизайн забезпечує високу стабільність, але не таку як двопроменевий, оскільки два детектори можуть давати дрейф незалежно один від одного. Крім того, при розщепленні через зразок проходить менше 100% світла.

Дизайн з двома довжинами хвилі

При застосуванні такого СФ для певних цілей, наприклад, для вивчення двох конкурентних реакцій у зразку, дві довжини хвилі можна вимірювати одночасно.

Монохроматор має два дисперсні пристрої, які на виході об'єднують розщеплений пучок світла в один промінь. Ці складні прилади набагато дорожчі, ніж традиційні СФ, і дуже часто замінюються на СФ з діодним пристроєм, котрі дозволяють вимірювати багато довжин хвилі.

Вимірювання спектра

Ступінь взаємодії зразка з випромінюванням (пропусканням або поглинанням) визначається вимірюванням інтенсивності падаючого світла (без зразка) та інтенсивності пропущеного світла (із зразком). Ці інтенсивності позначаються відповідно I_0 та I у рівняннях, наведених у розділі "Пропускання і поглинання". Оскільки більшість зразків, що вимірюються за допомогою УФ-вимірної спектроскопії, знаходяться у розчинах, сліпий дослід повинен вимірюватися в кюветі, що містить чистий розчинник, який використовується для приготування зразка. Цей процес усуває з вимірювань зразка будь-яке поглинання за рахунок розчинника.

З однопроменевим приладом, кювету, що містить розчинник, вміщують в СФ і вимірюють сліпий дослід. Потім в цій же кюветі вимірюють розчин зразка. Всі сучасні прилади автоматично фіксують еталонні (reference) значення I_0 , які використовуються для розрахунку величин поглинання зразка.

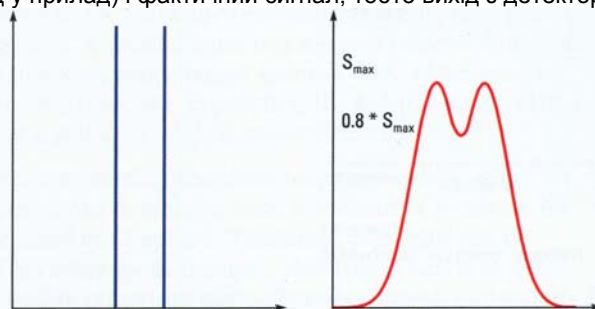
Для двопроменевого приладу або приладу з розщепленим променем необхідні дві кювети. Обидві кювети спочатку заповнюють чистим розчинником і проводять так зване баланс-вимірювання. Це дозволяє мати різницю в поглинанні при вимірюванні з двома оптичними доріжками. Кювету потім заповнюють розчином зразка для вимірювання і фактично одночасно вимірюють I_0 та I . В отриманому спектрі роблять поправку, вираховуючи баланс-спектр.

Ключові інструментальні параметри

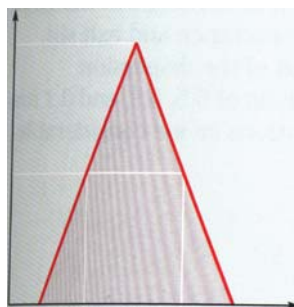
У цьому розділі розглядаються деякі інструментальні параметри, які можуть впливати на правильність (акуратність) і точність вимірювання (див. Додаток А для більш детального визначення термінів правильність (акуратність - assigasu) і точність (precision)). Джерела помилок при вимірюванні, пов'язані з підготовкою зразка, розглядаються в главі 3.

Спектральна роздільна здатність

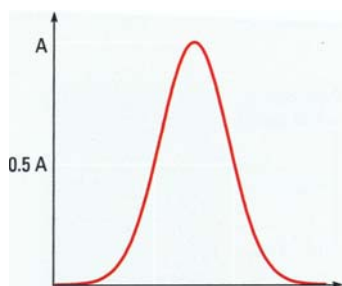
Спектральна роздільна здатність – це міра здатності приладу розділяти дві суміжні довжини хвилі. Дві довжини хвилі вважаються розділеними, якщо мінімум між двома піками детекторного сигналу становить менше 80% максимуму. Ця умова відома як критерій Релея. На рис.29 схематично показано випадок для двох суміжних емісійних ліній (вхід у прилад) і фактичний сигнал, тобто вихід з детектора.



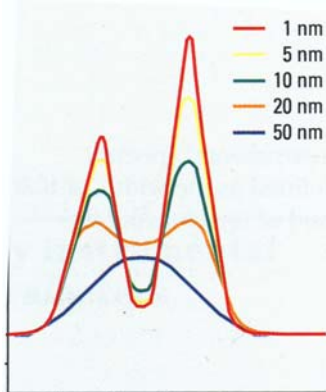
Розділення тісно пов'язане з інструментальною спектральною шириною смуги (СШС). СШС визначається як ширина, при напівмаксимумі інтенсивності, смуги світла, що виходить з монохроматора (див.рис.30).



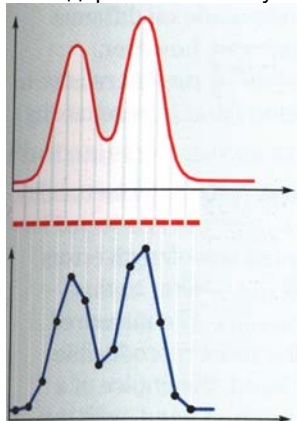
Правильність вимірювання поглинання залежить від співвідношення СШС і природної (natural) ширини смуги (ПШС) поглинаючої речовини. ПШС – це ширина смуги поглинання зразка при напівмаксимумі поглинання (див.рис.31).



Співвідношення $\text{СШС}/\text{ПШС} = 0,1$ або менше дозволяє проводити вимірювання з точністю до 99,5 % і навіть більше. При $\text{СШС}/\text{ПШС}$ більше 0,1 виміряний спектр стає більш викривленим (див.рис.32). При більшості довжин хвиль смуги неможливо розділити коректно, а у величинах поглинання спостерігаються значні помилки. СШС, перш за все, є функцією ширини вхідної і вихідної щілин монохроматора, а також дисперсії за рахунок решітки. Роздільна здатність, що становить 0,5, 0,2 та 0,1 нм, не є незвичайною, але більш високі значення викликають значне погіршення співвідношення С/Ш.



В сучасних СФ інтервал, необхідний для одержання цифрових даних спектра для комп'ютерної обробки, а також час зберігання зразка також впливають на роздільну здатність. Цей ефект показаний на рис.33. Якщо інтервал великий по відношенню до СШС, роздільна здатність приладу погіршується. Менший інтервал покращує результати, але при цьому набагато збільшують спектральні файли (?) (files), що ускладнює визначення. На практиці цей інтервал повинен дорівнювати чи бути трохи меншим, ніж СШС.

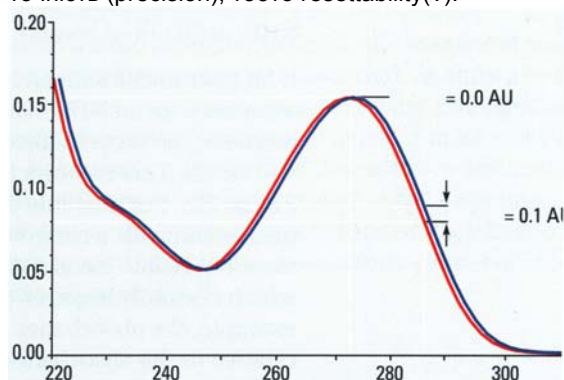


Беручи до уваги інструментальні вимоги, важливо визначити, яка роздільна здатність потрібна. Як уже зазначалося в главі 1 "Принципи і застосування УФ-видимої спектроскопії", смуги поглинання в УФ-видимій області звичайно досить широкі, особливо для зразків у розчині. Майже для 99% звичайних вимірювань $\text{СШС} = 2$ нм більш ніж адекватна для одержання точних результатів при вимірюванні смуг поглинання з $\text{ПШС} = 20$ нм або більше. Якщо прилад з $\text{СШС} = 2$ нм застосовується для вимірювання зразків з ПШС менше 20 нм

(наприклад, бензолу), матимемо помилку в абсолютних вимірюваннях, яка збільшуватиметься із зменшенням ПШС. Для абсолютних вимірювань необхідний прилад з малою СШС. Але більшість вимірювань із застосуванням УФ-видимої спектроскопії проводяться для кількісного визначення, яке звичайно потребує лише відносних вимірювань (наприклад, поглинання невідомої концентрації відносно поглинання стандарту). Калібрування, виконане з використанням стандартів, які підтримують (bracket?) концентрацію невідомого, забезпечить правильні кількісні результати навіть для дуже вузьких смуг поглинання.

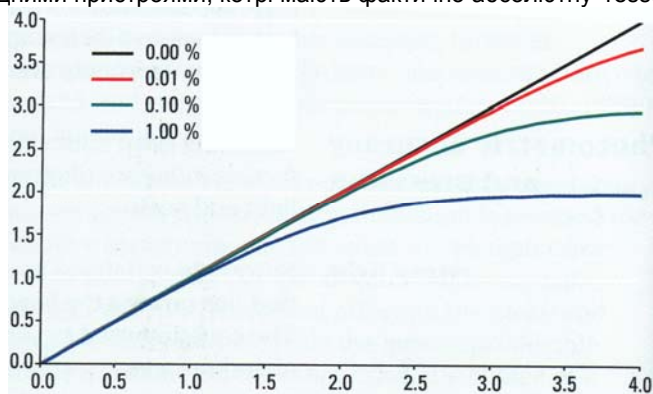
Акуратність і точність довжини хвиль

Різниця між цими поняттями звичайно не добре зрозуміла (див. Додаток А для пояснення). Акуратність (assurasy) важлива для порівняння вимірювань, проведених на різних приладах. Але в УФ-видимій спектроскопії вимірювання відносно стандартів проводяться на одному й тому ж приладі і тут більш важлива точність (precision), тобто resettability(?).



На рис.34 показано ефект поганої resettability (відтворюваності ?) довжини хвилі. Якщо довжина хвилі при максимумі поглинання вибирається для кількісних вимірювань, невеликі помилки в довжині хвилі, які трапляються при переналадженні (resetting) СФ на цю довжину, будуть мати мінімальний вплив на виміряне поглинання. Цей метод забезпечує найбільш відтворювані кількісні результати. З іншого боку, вибір довжини хвилі на смугі поглинання, з тією ж самою помилкою, зумовить значні помилки у виміряному поглинанні. У цьому випадку кількісні результати не надійні.

Усі стандартні тексти з УФ-видимої спектроскопії наголошують, що для акуратного кількісного визначення аналітична довжина хвилі повинна бути при максимумі поглинання, навіть якщо інші довжини можуть давати кращу селективність. Однак, ці тексти базуються на традиційних методиках механічного сканування і не стосуються приладів з діодними пристроями, котрі мають фактично абсолютну resettability довжини хвилі.



Фотометрична акуратність і точність

При хорошому оптичному та електронному дизайні лише два фактори впливають на фотометричну акуратність і точність – розсіяне світло і шум.

Розсіяне світло. Розсіяним світлом вважають відчутне детектором світло при будь-якій довжині хвилі, що лежить поза шириною смуги вибраної довжини хвилі. Рівняння для розрахунку трансмісії і поглинання має вигляд:

(стор.57)

де T – трансмісія, I_0 – інтенсивність падаючого (incident) світла, I – інтенсивність пропущеного світла, I_s – інтенсивність розсіяного світла.

Інтенсивність розсіяного світла звичайно не залежить від інтенсивності пропущеного світла. Якщо I_s залишається майже постійною величиною, вона є домінуючою при низьких значеннях I . При високому поглинанні розсіяне світло зумовлює негативну помилку в чутливості приладу і є, в решті решт, лімітуючим фактором для поглинання, а значить, і для концентрації, що визначається. Фотометрична акуратність

приладу є, таким чином, компромісною. На рис.35 показано вплив різних рівнів розсіяного світла на виміряне поглинання в порівнянні з фактичним поглинанням.

Шум. СФ типово має два шумових елементи. Перший елемент (фотонний або Schott шум) – від статистичного розподілення фотонів, що їх випромінює джерело світла. Він пропорційний кореню квадратному інтенсивності світла.

Коли вимірюються зразки малої концентрації з низьким поглинанням, цей елемент може заважати акуратному вимірюванню малої різниці між двома високими рівнями світла. Другий елемент притаманний електронним пристроям приладу (детекторному підсилювачу, analog-to-digital converter та ін.) і не залежить від виміряної інтенсивності. Цей елемент набуває значення при високих рівнях поглинання, коли сигнал зразка дуже малий. При хорошому дизайні його можна звести до мінімуму.

Шум негативно впливає на точність (precision) вимірювань і, для окремих вимірювань, може вносити помилки також в акуратність. Але його можна зменшити, збільшивши час вимірювання (див. далі "Time averaging").

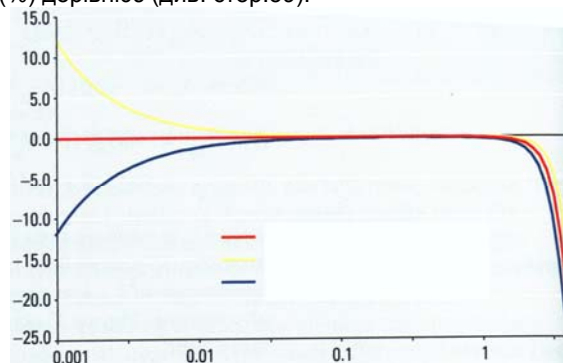
Лінійний динамічний діапазон

Часто спірним і не зовсім зрозумілим поняттям є діапазон приладу (instrumental range). У більшості випадків – це просто цифровий діапазон, який може проявляти (показувати) прилад. Більш придатним є поняття лінійний динамічний діапазон, що характеризує, для даного прийнятного відхилення від лінійності (як процент поглинання), величини мінімального і максимального поглинання.

Потенціальні помилки при різному поглинанні можуть бути розраховані із stray light і шуму.

Так, помилка за рахунок розсіяного світла (%) дорівнює (див. стор.59 та рис.35).

Помилка за рахунок шуму (%) дорівнює (див. стор.59).



Загальна помилка - це сума попередніх двох помилок. На рис.36 показана загальна помилка для прикладу з фотонним шумом, що становить плюс-мінус 0.0004 AU, і електронним шумом - плюс-мінус 0.0001 AU. З рисунка видно, що вимірювання, проведені від 0.3 до 1.0 AU, мають найбільшу акуратність і точність. Інструментальний динамічний діапазон можна визначити з прийнятною помилкою вимірювання.

Дрейф

Інша потенціальна причина фотометричної помилки – це дрейф (drift). Він звичайно є наслідком зміни інтенсивності джерела між вимірюванням I_0 та

I . Порушення роботи електронних пристроїв у приладі також можуть давати дрейф. Хороший дизайн приладу може звести до мінімуму дрейф, але цей ефект може погіршити акуратність результатів, особливо упродовж великого проміжку часу (див.рис.37). З багатьма значеннями довжин хвиль проблема дрейфу може бути зведена до мінімуму шляхом застосування таких методик, як внутрішнє еталонування (див. стор.80 "Internal referencing").