

## 8. ПАГЛЫНАННЕ СВЯТЛА

Пры распаўсюджванні святла мае месца ўзаемадзеянне светлавых хваль з часціцамі рэчыва. Гэты працэс суправаджаецца перадачай энергіі хвалі часціцам рэчыва. У залежнасці ад прыроды хвалі і ўласцівасцей асяроддзя механізм перадачы энергіі можа быць розным.

Паглыннанне святла выкарыстоўваецца ў розных абласцях навукі і тэхнікі. На ім заснаваны многія высокаадчувальныя метады колькаснага і якаснага хімічнага аналізу, у прыватнасці абсарбцыйны спектральны аналіз, спектрафотаметрыя, каларыметрыя і інш. Выгляд спектраў паглынання абумоўлены хімічнай структурай рэчыва, таму па выглядзе спектра паглынання можна даследаваць характар руху электронаў у металах, высветліць зонную структуру паўправаднікоў.

У апошні час шырока выкарыстоўваецца аналіз малекулярнага саставу складаных рэчываў, заснаваны на вымярэнні паглынання ва ультрафіялетавай і інфрачырвонай абласцях спектра. Спектры паглынання арганічных малекул маюць пэўныя характарыстыкі, дзякуючы якім можна ўстанаўліваць малекулярны састаў і колькасць асобных кампанентаў.

Трэба таксама адзначыць, што памяншэнне светлавой энергіі адбываецца не толькі ў выніку паглынання, але і ў выніку іншых з'яў, якія маюць месца пры распаўсюджванні святла ў асяроддзі.

### 8.1. Закон Бугера — Ламберта.

#### Каэфіцыент паглынання

Пры праходжанні светлавой хвалі праз рэчыва ў большасці выпадкаў назіраецца памяншэнне яе энергіі. З'ява памяншэння інтэнсіўнасці святла пры праходжанні праз рэчыва атрымала назву паглынання або абсорбцыі святла (ад лац. *absorbeo* — паглынаю). Паглыннанне святла звязана з ператварэннем энергіі электрамагнітнага поля светлавой хвалі ў іншыя віды энергіі (часцей за ўсё ў энергію хаатычнага цеплавога руху часціц рэчыва). Часткова

энергія святла зноў аднаўляецца ў выглядзе другасных хваль, якія выпраменьваюць электроны рэчыва пры ўзаемадзеянні са светлавымі хвалямі. Пры паглыннанні святла атамамі (малекуламі) асяроддзя можа адбывацца пераход атама (малекулы) ва ўзбуджаны стан. Пры гэтым энергія фатона павінна адпавядаць рознасці энергій асноўнага і ўзбуджанага станаў. Такое паглыннанне называюць аднафатонным.

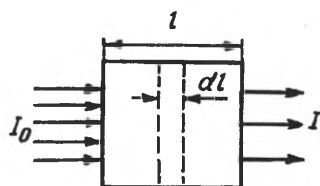


Рис. 8.1.

Няхай на паверхню рэчыва перпендыкулярна падае паралельны пучок святла інтэнсіўнасцю  $I_0$  (рис. 8.1). Таўшчыня слоя рэчыва  $l$ . Інтэнсіўнасць святла, якая прайшла праз рэчыва,  $I$ . Відавочна, што памяншэнне інтэнсіўнасці святла на шляху  $dl$  будзе прапарцыяна даўжыні гэтага шляху і інтэнсіўнасці святла:

$$dI = -\alpha I dl, \quad (8.1)$$

дзе  $\alpha$  — каэфіцыент паглынання, які залежыць ад даўжыні хвалі святла, хімічнай прыроды і стану рэчыва. Знак «мінус» паказвае, што з павелічэннем таўшчыні слоя рэчыва інтэнсіўнасць святла, якое прайшло праз гэты слой, памяншаецца.

Роўнасць (8.1) можна занісаць у выглядзе

$$\frac{dI}{I} = -\alpha dl.$$

Калі ўзяць інтэграл, то атрымаем

$$\int_0^l \frac{dI}{I} = - \int_0^l \alpha dl \quad \text{або} \quad \ln I - \ln I_0 = -\alpha l,$$

адкуль

$$I = I_0 e^{-\alpha l}. \quad (8.2)$$

Роўнасць (8.2) атрымала назву *закону Бугера — Ламберта*. Гэты закон быў эксперыментальна ўстаноўлены ў 1729 г. французскім фізікам П. Бугерам (1698 — 1758) і потым тэарэтычна выведзены ў 1760 г. нямецкім вучоным І. Ламбертам (1728 — 1777).

Як відаць з роўнасці (8.2), каэфіцыент паглынання  $\alpha$  вызначае таўшчыню слоя рэчыва  $l$ , роўную  $1/\alpha$ , пасля праходжання якога інтэнсіўнасць плоскай хвалі памяншаецца ў  $e$  разоў.

Каэфіцыент паглынання залежыць таксама і ад канцэнтрацыі раствору:

дзе  $c$  — канцэнтрацыя раствору;  $\alpha_1$  — каэфіцыент паглынання асобнай малекулы рэчыва. Роўнасць (8.3) называецца *правіла Бера*. Гэтая роўнасць выконваецца толькі пры малых канцэнтрацыях, для вялікіх канцэнтрацый назіраецца парушэнне залежнасці. Такое парушэнне абумоўлена павелічэннем узаемадзеяння паміж блізка размешчанымі малекуламі рэчыва.

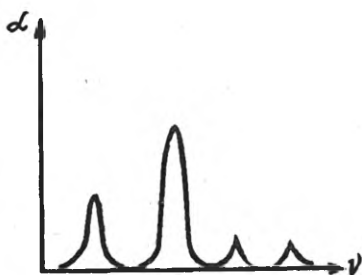
У светлавых пучках вельмі вялікай інтэнсіўнасці паглынне святла перастае падпарадкоўвацца закону Бугера — Ламберта. Каэфіцыент паглынання становіцца функцыяй інтэнсіўнасці святла, мае месца нелінейнае паглынне яго. Гэты эффект абумоўлены тым, што вялікая частка часціц пры паглыннанні пераходзіць ва ўзбуджаны стан і губляе пры гэтым здольнасць паглынаць святло.

## 8.2. Механізм паглынання святла рознымі рэчывамі

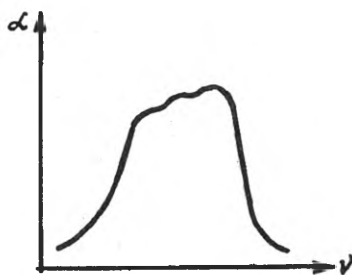
У дыэлектрыках няма свабодных электронаў, і паглынне святла цесна звязана са з'явай рэзанансу пры вымушаных ваганнях электронаў у атамах і атамаў у малекулах. Энергія светлавой хвалі затрачваецца на вымушаныя ваганні часціц у час рэзанансу, г. зн. тых часціц, уласная частата якіх прыкладна роўная частаце светлавой хвалі. Калі ўласная частата ваганняў часціцы значна адрозніваецца ад частаты падаючай светлавой хвалі, то часціца не прыходзіць у вагальны рух і, значыць, светлавая хваля пры гэтым не траціць сваёй энергіі. Такая часціца не паглынае святла. Таму дыэлектрыкі паглынаюць святло выбіральна (селектыўна), г. зн. толькі хвалі пэўнай частаты. Паглынне адбываецца толькі ў абласцях частот каля частот уласных ваганняў электронаў і атамаў у малекулах. Для святла астатніх частот дыэлектрык практычна з'яўляецца празрыстым. Найбольш яркая гэтая з'ява рэзананснага паглынання выяўляецца ў разрэджаных аднаатамных газах. Для такіх газаў характэрны лінейчасты спектр паглынання (рыс. 8.2). Спектр паглынання ізаляваных атамаў мае выгляд вузкіх ліній, г. зн. каэфіцыент паглынання адрозніваецца ад нуля толькі ў пэўных вузкіх дыяпазонах даўжынь хваль, якія адпавядаюць частотам уласных ваганняў электронаў у атамах.

У газах з мнагаатамнымі малекуламі назіраюцца сістэмы цесна размешчаных ліній, якія ўтвараюць палосы паглынання (рыс. 8.3). Структура гэтых палос вызначаецца складам і будовай малекул, г. зн. па выглядзе спектраў паглынання можна меркаваць аб унутранай будове малекул. Такі метада эксперыментальнага даследавання будовы малекул атрымаў назву абсарбцыйнага спектральнага аналізу.

У выпадку вадкіх і цвёрдых дыэлектрыкаў палосы паглынання вельмі шырокія (рыс. 8.4). Унутры палос каэфіцыент паглынання



Рыс. 8.2.



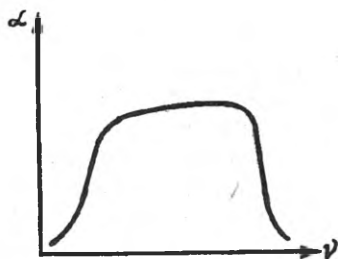
Рыс. 8.3.

змяняецца плаўна, за палосамі  $\alpha \approx 0$ . Лічаць, што вадкія і цвёрдыя дыэлектрикі маюць безупынныя (суцэльныя) спектры паглынання. Гэта глумачыцца тым, што ў кандэнсаваных асяроддзях моцнае ўзаемадзеянне паміж часціцамі прыводзіць да хуткай перадачы ўсім часціцам рэчыва паглынутай светлавой энергіі.

Механізм адбіцця і паглынання святла ў металах адрозніваецца ад падобных працэсаў у дыэлектриках.

У газападобным стане металы з'яўляюцца дыэлектрикамі, таму для іх характэрны адпаведныя спектры паглынання. У кандэнсаваным стане металы ўтрымліваюць вялікую колькасць свабодных электронаў і таму з'яўляюцца праваднікамі электрычнасці. У электрычным полі светлавой хвалі свабодныя электроны пачынаюць упарадкавана рухацца і выпраменьваюць пры гэтым другасныя хвалі. Дзякуючы накладанню першаснай і другаснай хваль утвараецца інтэнсіўная адбітая хваля і адносна слабая праломленая хваля. Гэтая хваля хутка паглынаецца пры распаўсюджванні ў метале. Яе энергія траціцца на цеплыню, якая вылучаецца токамі праводнасці, што ўзнікаюць пры дзеянні святла на свабодныя электроны. Па выглядзе спектраў паглынання можна вызначаць характар руху электронаў у металах.

Частка святла, якая не прапускаецца металам у выніку адбіцця і якая затрымліваецца дзякуючы паглынанию, залежыць ад яго праводнасці. У ідэальным правадніку страты на цеплыню амаль адсутнічаюць, паглынання роўна нулю і падаючае святло цалкам адбіваецца. У тонкіх чыстых сярэбраных плёнках адбіццё дасягае 98 — 99 %, а паглынання складае каля 0,5 % (у якасці прыкладу можна назваць натрыў). Адбіццё святла для жалеза складае каля



Рыс. 8.4.

30 — 40 %. Непразрыстая тонкая ( $\sim 10^{-7}$  м) плёнка жалеза паглынае амаль 60 % падаючага святла. Назіранні паказваюць, што чым большы каэфіцыент электраправоднасці, тым вышэй каэфіцыент адбіцця металаў.

Аптычныя ўласцівасці металаў абумоўлены галоўным чынам паводзінамі свабодных электронаў толькі пры параўнальна невялікіх частотах падаючых светлавых хваль. Калі на паверхню металу падаюць хвалі высокіх частот (бачнае і ультрафіялетавае святло), то, акрамя свабодных электронаў, у працэсах адбіцця і паглынання заметную ролю адыгрываюць і звязаныя электроны, якія маюць уласную частату ваганняў. Такія электроны значна ўплываюць на характар аптычных уласцівасцей металаў. Так, для ультрафіялетавых прамянёў каэфіцыент адбіцця серабра складае каля 4,2 %.

Заканамернасці абсорбцыі святла ў асноўным вызначаюцца ўласцівасцямі атама або малекулы, якія паглынаюць святло. Аднак навакольныя малекулы могуць значна ўплываць на гэтыя працэсы. Уплыў навакольнага асяроддзя часам радыкальна мяняе абсарбцыйную здольнасць атамаў вадкіх і цвёрдых цел. Пад уздзеяннем палёў навакольных малекул моцна мяняюцца паводзіны электронаў, якія вызначаюць аптычныя ўласцівасці атамаў.

### 8.3. Колер і паглынне святла

Пры распаўсюджванні святла ў рэчывах мае месца яго паглынне. Звычайна паглынне носіць селектыўны характар, г. зн. святло розных даўжынь хваль паглынаецца па-рознаму. Паколькі даўжыня хвалі вызначае колер святла, то, значыць, прамяні розных колераў паглынаюцца па-рознаму.

Выбіральным (селектыўным) паглыннем тлумачыцца афарбоўка цел. Каляровымі празрыстымі з'яўляюцца целы, якія селектыўна паглынаюць святло ў межах бачных прамянёў. Напрыклад, чырвоным будзе шкло, якое слаба паглынае чырвоныя прамяні і моцна ўсе астатнія.

Целы, якія слаба паглынаюць святло ўсіх даўжынь хваль бачнага спектра, з'яўляюцца празрыстымі неафарбаванымі. Напрыклад, звычайнае шкло таўшчынёй 1 см паглынае толькі каля 1 % бачных прамянёў, якія падаюць на яго. Але шкло моцна паглынае ультрафіялетавыя і інфрачырвоныя прамяні.

Афарбоўка непразрыстых цел абумоўлена селектыўным адбіццём святла ад іх паверхні і залежыць не толькі ад аптычных уласцівасцей іх паверхні (фарбы), але і ад спектральнага складу святла, якое падае на паверхню. Напрыклад, цела, якое пакрыта чырвонай фарбай, будзе здавацца чорным пры асвятленні яго зялёным святлом.

Калі такое цела асветлена белым святлом, то яно адбівае толькі чырвоныя прамяні і будзе здавацца чырвоным.

Афарбоўка матэрыялаў пры селектыўным паглыннанні і адбіцці святла будзе рознай. Так, напрыклад, тоўсты кавалак золата мае жоўта-чырвоную афарбоўку, але калі з яго зрабіць тонкі залаты пялёстак, то пры назіранні праз яго колер прадметаў будзе блакітны. У першым выпадку афарбоўка золата абумоўлена селектыўным адбіццём, а ў другім — селектыўным паглыннаннем.

Пры падзенні святла на паверхню больш інтэнсіўна адбіваюцца тыя хвалі спектра, якія ўнутры слоя рэчыва больш паглынаюцца. Таму колер рэчыва, які ўзнікае дзякуючы селектыўнаму адбіццю, дапаўняе колер таго ж рэчыва, які ўзнікае пры селектыўным паглыннанні.

#### 8.4. Спектры выпраменьвання і паглынання. Спектральны аналіз

Аптычныя спектры падзяляюць на спектры выпраменьвання (эмісійныя) і спектры паглынання (абсарбцыйныя). Спектры выпраменьвання атрымліваюцца ад крыніц святла пры раскладанні іх выпраменьвання па даўжынях хваль спектральнымі прыборамі. Гэтыя спектры звычайна характарызуюцца функцыяй  $f(\lambda)$ , якая вызначае размеркаванне энергіі святла ў залежнасці ад  $\lambda$ . Паколькі

$$\nu = \frac{c}{\lambda},$$

то часам карыстаюцца функцыяй размеркавання светлавой энергіі па частотах  $f_1(\nu)$ .

Спектры паглынання звычайна атрымліваюцца пры праходжанні святла праз рэчыва. Калі такое святло раскласці пры дапамозе спектральнага прыбора па даўжынях хваль  $\lambda$ , то атрымаем спектр паглынання. Спектры паглынання вызначаюцца часткай энергіі святла кожнай даўжыні хвалі, якая паглынаецца. Гэтую велічыню называюць каэфіцыентам паглынання  $\alpha(\lambda)$ . Памяншэнне энергіі святла пры праходжанні праз рэчыва таксама звязана з рассеяннем і адбіццём. Таму, акрамя  $\alpha(\lambda)$ , ужываюць каэфіцыент рассеяння  $\gamma(\lambda)$  і каэфіцыент адбіцця  $R(\lambda)$ .

Для рэгістрацыі спектраў карыстаюцца часцей за ўсё фатаграфічнымі метадамі. Ва ультрафіялетавай вобласці прымяняюць лічыльнікі фатонаў, а ў інфрачырвонай — балометры. Спектры бачнага святла можна назіраць пры дапамозе спектраскопаў.

Спектры падзяляюць на лінейчастыя, паласатыя і безупынныя. Лінейчастыя спектры складаюцца з асобных спектральных ліній, якія адпавядаюць дыскрэтным значэнням даўжынь хваль  $\lambda$ . Пала-

сатыя спектры маюць выгляд асобных палос, кожная з якіх ахоплівае некаторы інтэрвал  $\lambda$ . Безупынным спектры ахопліваюць шырокі інтэрвал даўжынь хваль. Пры вымярэннях асобная спектральная лінія не адпавядае строга вызначанаму значэнню  $\lambda$ , а заўсёды мае канечную шырыню  $\Delta\lambda$ .

Выгляд спектра залежыць ад стану рэчыва. Калі пры дадзенай тэмпературы рэчыва знаходзіцца ў стане тэрмадынамічнай раўнавагі з выпраменьваннем, то яно выпраменьвае безупынный спектр. Звычайна такая раўнавага адсутнічае і спектры могуць мець самы розны выгляд. У прыватнасці, для атамаў характэрны лінейчастыя спектры, для нескладаных малекул — паласатыя, інакш кажучы — малекулярныя спектры.

Выпраменьванне і паглыннанне ўзнікаюць пры квантавых пераходах паміж узроўнямі энергіі атамаў і малекул. Спектры выпраменьвання адпавядаюць магчымым квантавым пераходам з верхніх узроўняў на ніжнія, а спектры паглынання — з ніжніх узроўняў на верхнія. Розным аптычным дыяпазнам  $\lambda$  адпавядаюць розныя энергіі фатонаў:

$$h\nu = E_2 - E_1,$$

дзе  $E_1$  і  $E_2$  — энергіі ўзроўняў, паміж якімі адбываюцца пераходы.

Сукупнасць фізічных метадаў якаснага і колькаснага вызначэння саставу рэчыва, якія заснаваныя на атрыманні і даследаванні яго спектраў, называюць спектральным аналізам. Від спектральнага аналізу залежыць ад мэты яго і тыпу спектраў. Атамны спектральны аналіз вызначае склад рэчыва па лінейчастых (атамных або іонных) спектрах выпраменьвання і паглынання. З дапамогай малекулярнага спектральнага аналізу вызначаюць малекулярны склад рэчыва па малекулярных спектрах. Эмісійны спектральны аналіз праводзяць па спектрах выпраменьвання, абсарбцыйны — па спектрах паглынання.

Якасны спектральны аналіз ажыццяўляюць шляхам параўнання спектра рэчыва, якое даследуецца, са спектрам эталонаў. У аснове колькаснага спектральнага аналізу ляжыць залежнасць канцэнтрацыі таго ці іншага элемента ад інтэнсіўнасці ліній  $I$  ў спектры, якія адпавядаюць гэтым элементам,

$$\frac{I_1}{I_2} = ac^b,$$

дзе  $I_1$  — інтэнсіўнасць лініі элемента;  $I_2$  — інтэнсіўнасць лініі параўнання;  $a$  і  $b$  — пастаянныя, якія вызначаюцца на вопыце.

Пры эмісійным спектральным аналізе для атрымання спектраў выпраменьвання рыхтуюць спецыяльную пробу рэчыва і ўводзяць

яе ў крыніцу выпраменьвання. Для ўзбуджэння спектраў выкарыстоўваюць розныя крыніцы святла. Выбар крыніцы часцей за ўсё залежыць ад канкрэтных умоў аналізу. У якасці першай штучнай крыніцы святла пры спектральным аналізе было выкарыстана пыляма газавай гарэлкі. Потым пачалі прымяняць электрычныя дугі пастаяннага і пераменнага току, а таксама іншыя тыпы электрычнага разраду. У апошні час у якасці крыніц выкарыстоўваюць лазеры.

## 8.5. Святлафільтры

*Святлафільтрамі* называюць прылады, якія змяняюць спектральны састаў і энергію аптычнага выпраменьвання, што падае на іх.

Разгледзім асноўныя характарыстыкі святлафільтраў.

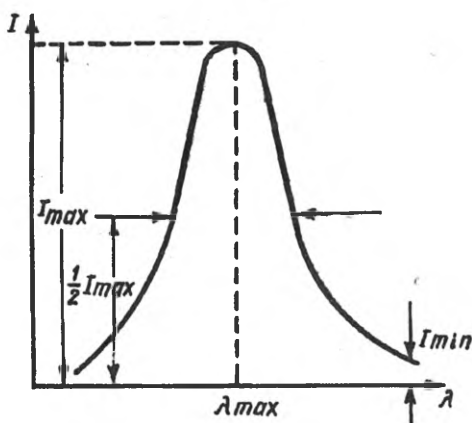
1. Прапусканне ў максімуме паласы прапускання

$$T = I(\lambda) / I_0(\lambda),$$

дзе  $I_0(\lambda)$  — інтэнсіўнасць святла, якое падае на святлафільтр;  $I(\lambda)$  — інтэнсіўнасць святла, якое праходзіць праз святлафільтр у максімуме паласы прапускання (рыс. 8.5). Святлафільтры таксама характарызуюцца аптычнай шчыльнасцю  $D$ :

$$D = \lg(1/T) = \lg(I_0/I).$$

Калі не ўлічваць мнагакратнага адбіцця святла на паверхнях, аптычная шчыльнасць некалькіх паслядоўна размешчаных фільтраў роўная суме іх шчыльнасцей:



Рыс. 8.5.

$$D = \sum_{i=1}^n D_i.$$

2. Даўжыня хвалі  $\lambda_{\max}$ , якая адпавядае максімуму паласы прапускання.

3. Спектральная шырыня паласы прапускання  $2\delta\lambda$ , што вымяраецца шырынёй спектральнага інтэрвалу, на межах якога інтэнсіўнасць святла складае палову інтэнсіўнасці ў максімуме паласы прапускання ( $I_{\max}/2$ ).

4. Астаткавая прапускарнасьць ( $I_{\min}$ ) у вобласці спектра, далёкай ад  $\lambda_{\max}$ . Замест астаткавай прапускарнасьці часта карыстаюцца фактарам кантрастнасці святлафільтра:

$$C = I_{\max}/I_{\min}.$$

5. Апертура святлафільтра — вуглавая шырыня светлага пучка, пры якой монахраматычнасьць святлафільтра яшчэ не пагаршаецца прыметна з вуглавым пашырэннем падаючага светлага пучка.

Адрозніваюць нейтральныя і селектыўныя святлафільтры. Святлафільтр нейтральны, калі яго аптычная шчыльнасьць у пэўнай спектральнай вобласці не залежыць ад даўжыні хвалі. Прыкладам такіх святлафільтраў у бачнай і ультрафіялетавай абласцях спектра з'яўляюцца тонкія плёнкі алюмінію і плаціны, якія звычайна атрымліваюцца шляхам напылення металу на шклянную або кварцавую аснову. Фільтры, аптычная шчыльнасьць якіх залежыць ад даўжыні хвалі, называюцца селектыўнымі. Селектыўныя святлафільтры даюць магчымасць выдзяляць пэўную спектральную вобласць. Калі прапускаецца вузкая спектральная вобласць, то святлафільтр называюць вузкапалосным або монахраматычным. Лепшыя монахраматычныя святлафільтры маюць шырыню паласы прапускання 0,1 нм.

Дзеянне святлафільтраў можа быць заснавана на розных аптычных з'явах: паглыннанні святла (абсарбцыйныя), інтэрферэнцыі святла (інтэрферэнцыйныя), адбіцці святла (адбівальныя), дысперсіі святла (дысперсійныя) і інш.

Найбольш распаўсюджаны шклянны абсарбцыйныя святлафільтры, якія вылучаюцца пастаянствам спектральных характарыстык, устойлівасцю да ўздзеяння святла і тэмпературы, высокай аптычнай аднароднасцю. Часам выкарыстоўваюцца вадкасныя абсарбцыйныя святлафільтры, якія могуць плаўна мяняць спектральныя характарыстыкі пры змяненні канцэнтрацыі раствору. У некаторых выпадках, напрыклад для вылучэння ультрафіялетавай вобласці спектра, прымяняюць газавыя абсарбцыйныя святлафільтры.