

В. А. Одарич

## Металооптика

**МЕТАЛООПТИКА** – розділ оптики, що вивчає оптичні й електродинамічні властивості металів і взаємодію з ними оптичного випромінювання. Основні особливості оптичних властивостей металів: великі коефіцієнти відбивання ( $R \sim 99\%$  у широкому діапазоні довжин хвиль) та поглинання. Електромагнітна хвиля всередині металу затухає, пройшовши шар завтовшки  $d \sim 2 - 5 \times 10^{-6}$  см. Ці особливості пов'язані з високою концентрацією в металі  $\sim 10^{22} - 10^{23}$  см<sup>-3</sup> електронів провідності. В ультрафіолетовій області коефіцієнт відбивання  $R$  падає, і метали за своїми властивостями наближаються до діелектриків (див. [Матеріали електроізоляційні](#)). При ще більших частотах (рентгенівська область) оптичні властивості визначають електрони внутрішніх оболонок атомів, і метали за оптичними властивостями стають подібними до діелектриків. Як і в діелектриках, у спектрах металів проявляються смуги поглинання, пов'язані зі збудженням електронних переходів між різними енергетичними зонами. Завдяки сильній взаємодії електронів між собою смуги поглинання у металах значно ширші, ніж у діелектриках. Зазвичай у металів спостерігають кілька смуг, що розташовані переважно у видимій і близькій ультрафіолетовій, рідше інфрачервоній зонах спектра.

Повне пояснення експериментальних даних можливе лише завдяки застосуванню методів квантової механіки. Однак основні особливості оптичних властивостей описують за допомогою формальної теорії, що розглядає метал як неперервне провідне середовище з такими характеристиками, як діелектр. ( $\epsilon$ ), магнітна ( $\mu$ ) та електр. ( $\sigma$ ) провідності. При такому підході поширення електромагнітних хвиль у металах описують рівняннями Максвелла, що порівняно із діелектриками містять чл. із струмом провідності. Тобто діелектр. проникність металу є величиною комплексною

$$\epsilon = \epsilon_1 - i\epsilon_2 = \epsilon_1 - i\frac{4\pi\sigma}{\omega},$$

Для опису оптичних властивостей застосовують комплексний показник заломлення:  $n^*2 = \epsilon_1 - i\epsilon_2$ , де  $\epsilon_1 = n^2 - k^2$  і  $\epsilon_2 = 2nk$ . Величину  $n$  називають головним показником заломлення, величину  $k$  – головним показником затухання (поглинання). Теорія Максвелла передбачає при падінні світлової хвилі з вакууму на плоску поверхню металу існування 2-х хвиль –

відбитої, що йде назад у вакуум, і заломленої, що поширюється у металі. Геометричні закони відбивання світла такі ж, як і для непоглинаючих середовищ. Заломлена хвиля відзначається тим, що у металах площина рівних фаз і площина рівних амплітуд не перпендикулярні одна одній. Площина рівних амплітуд заломленої хвилі (площина А) паралельна межі металу, а площина рівних фаз (F) перпендикулярна до напрямку поширення хвилі. Напрямок хвилі визначається законом заломлення у формі  $\sin\varphi/\sin\psi = n\varphi$ , де показник заломлення  $n\varphi$  залежить від кута падіння  $\varphi$ . Затухання хвилі визначають показником поглинання  $k\varphi$ , що також залежить від кута падіння. Інтенсивність заломленої хвилі зменшується із глибиною проникнення світла за експоненціальним законом. На глибині

$$h_{\varphi} = \frac{\lambda_0}{4\pi k_{\varphi}}$$

інтенсивність світла зменшується в  $e$ -раз ( $\lambda_0$  – довжина світлової хвилі у вакуумі).  $h_{\varphi}$  – глибина скін-шару у металі. Проникнення світлової хвилі у тонкий приповерхневий шар металу є частинним випадком скін-ефекту, а сам шар – це скін-шар. Показники заломлення  $n\varphi$  і поглинання  $k\varphi$  виражають через головні оптичні константи металу та кут падіння за допомогою рівнянь  $n_2^2 - k_2^2 = n^2 - k^2$ ,  $n_2 k_2 \cos\psi = nk$ . Ці величини не залежать від кута падіння, їх називають інваріантами Кеттелера. Для залежних від кута падіння показників можна одержати

$$n_{\varphi}^2 = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 \varphi)^2 + (2nk)^2} + (n^2 - k^2 + \sin^2 \varphi) \right]$$

$$k_{\varphi}^2 = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 \varphi)^2 + (2nk)^2} - (n^2 - k^2 - \sin^2 \varphi) \right]$$

Коефіцієнт відбивання в р- і s-площинах зразка для металів є комплексним. При відбиванні між р- і s-компонентами електр. вектора з'являється різниця фаз, в результаті чого відбита світлова хвиля матиме еліптичну поляризацію. Визначивши параметри еліптичної поляризації, можна знайти оптичні константи металу  $n$  і  $k$ . Зв'язок між параметрами поляризації відбитого світла й оптичними сталими задано основним рівнянням еліпсометрії  $\tan\psi e^{-i\Delta} = r_p / r_s$ , де  $r_p$  і  $r_s$  – амплітудні коефіцієнти відбивання в р- і s-площинах зразка,  $\tan\psi$  – дійсна частина відношення цих коефіцієнтів відбивання,  $\Delta$  – різниця фаз між р- і s-компонентами електр. вектора відбитої світл. хвилі. Коефіцієнти відбивання визначають формулами Френеля, в які входять оптичні сталі. Із осн. рівняння еліпсометрії одержуємо зв'язок між оптичними сталими металу та вимірними значеннями еліпсометр. параметрів  $\psi$  і  $\Delta$  у вигляді

$$n^2 - \kappa^2 - \sin^2 \psi = \sin^2 \psi \cdot$$

$$tg^2 \varphi \frac{(1 - tg^2 \psi)^2 - 4tg^2 \psi \sin^2 \Delta}{(1 + tg^2 \psi + 2tg \psi \cos \Delta)^2},$$

$$n\kappa = 2\sin^2 \psi \cdot$$

$$tg^2 \varphi \frac{(1 - tg^2 \psi) tg \psi \sin \Delta}{(1 + tg^2 \psi + 2tg \psi \cos \Delta)^2}.$$

Еліпсометр. параметри вимірюють методами відбив. еліпсометрії за допомогою еліпсометрів.

Електронна теорія металів пояснює гол. особливості оптич. властивостей метал. середовищ поведінкою масиву електронів у зовн. електромагніт. полі. Відповідно до цієї теорії метал є системою фіксованих іонізов. атомів металу, що утворюють його кристалічну ґратку, і електронів, що вільно (чи майже вільно) рухаються між ними. У процесі руху електрони час від часу зіштовхуються з іонами кристаліч. ґратки, віддаючи їм певну кількість набутої енергії. У зовн. електромагніт. полі на хаотич. тепл. рух електронів накладається направлений рух, обумовлений взаємодією з полем. Існування зіткнень з іонами кристаліч. ґратки зумовлює появу електрич. опору металу, що описують провідністю  $\sigma$ . Саме рухливість вільних електронів є причиною залежності оптич. сталих металу від частоти падаючого випромінювання. Рівняння руху електрона у випадку металу не містить квазіпруж. сили, отже на відміну від зв'язаних зовн. електронів у діелектриках власні частоти вільних електронів дорівнюють нулеві. У рівнянні руху міститься член, що описує опір металу та затухання коливань електронів. Таким чином, рівняння руху має вигляд  $m\ddot{x} + m\gamma\dot{x} = eEx$ , де  $\gamma$  – показник затухання (подвоєна частота зіткнень), що, дорівнює оберненій величині часу релаксації (серед. часу вільного пробігу між двома послідов. зіткненнями). Розв'язок рівняння руху за наявності поля  $E_x$  дає зміщення електронів провідності залежно від частоти  $\omega$  поля. Це призводить до появи наведеного дипол. моменту та виникнення вторин. електромагніт. хвиль, що, складаючись із примус. зовн. полем, дають поле всередині металу, яке описують діелектрич. проникністю  $\epsilon$  і електр. провідністю  $\sigma$ . Для залежності цих величин від частоти  $\omega$  хвилі одержують

$$\sigma = \frac{Ne^2}{m} \frac{\gamma}{\omega^2 + \gamma^2},$$

$$\epsilon = 1 - \frac{4\pi Ne^2}{m} \frac{1}{\omega^2 + \gamma^2},$$

де  $m$  і  $N$  – відповідно маса та концентрація електронів. Для частот. залежностей оптич. сталих одержано рівняння

$$n^2 - k^2 = 1 - \frac{4\pi Ne^2}{m} \frac{1}{\omega^2 + \gamma^2},$$

$$nk = \frac{2\pi Ne^2}{m\omega} \frac{\gamma}{\omega^2 + \gamma^2}.$$

За низьких частот  $\omega$  і  $\gamma$  в області I оптичні сталі досягають великих значень  $n \approx k \approx 10-50$ ; область II (середній і ближній інфрачервоний діапазон) – це область релаксації; в області III, де показник поглинання досягає малих величин, метал має низьке відбивання і ця область є областю віднос. прозорості (ультрафіолет. діапазон). Якщо  $4\pi Ne^2 / m\omega^2 > 1$  (довгі хвилі), то показник заломлення є уявною величиною та відбувається практично повне відбивання світла; якщо ж  $4\pi Ne^2 / m\omega^2 < 1$  (короткі хвилі), то метал стає практично прозорим для нормально падаючого світла. Але проявляється явище повного внутр. відбивання, коли існує певний кут падіння, після якого хвиля повністю відбивається від поверхні металу. Коли  $4\pi Ne^2 / m\omega^2 = 1$  (у цій області частот  $\gamma$  і  $\omega$ ),  $n^2 - k^2 = 0$ ,  $n$  і  $k$  досягають значень, менших одиниці, і метал стає відносно прозорим. Циклічна частота, при якій починається прозорість, визначається співвідношенням

$$\omega_p = \left( \frac{4\pi Ne^2}{m} \right)^{1/2}.$$

Електронна теорія металів задовільно описує оптичні властивості лужних металів. М. дозволяє за оптич. характеристиками, виміряних у широкому спектрал. діапазоні, визначити осн. характеристики електронів провідності й електронів, що беруть участь у внутр. фотоефекті. М. має також і прикладне значення. Метал. дзеркала застосовують у різних приладах, при конструюванні яких необхідне знання  $R$ ,  $n$  і  $k$  в різних областях спектра. Вимірювання  $n$  і  $k$  дозволяє також встановити наявність на поверхні металу тонких плівок (напр., плівок окислу) і визначити їхні оптичні характеристики.

## Рекомендована література

1. Шишловський О. А. Експериментальна оптика. К., 1959;
2. Шишловський О. А. Прикладная физическая оптика. Москва, 1961;
3. Соколов А. В. Оптические свойства металлов. Москва, 1961;
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / Пер. с англ. Москва, 1973;
5. Ландсберг Г. С. Оптика. Москва, 2003;
6. Поперенко Л. В. Оптичні властивості опромінених металевих дзеркал. К., 2005;
7. Поперенко Л. В., Кудрявцев Ю. В., Стащук В. С., Йонг Пак Лі. Оптика металевих структур. К., 2013;

8. Манько Д. Ю., Поперенко Л. В., Юргелевич І. В. Металооптика: аморфні та шаруваті структури. К., 2015.

**Бібліографічний опис:**

Металооптика / В. А. Одарич // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2018. – Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-67461>. – Останнє поновлення : 13 трав. 2024.

2001-2024 © Ця енциклопедична стаття захищена авторським правом згідно з чинним законодавством України ([докладніше](#)).