

Кількісне визначення контрасту електронно-мікроскопічних зображень аморфних наноматеріалів складного хімічного складу

М.Ю. Бобик, В.П. Іваницький, В.С. Ковтуненко, О.Я. Сватюк*

Державний вищий навчальний заклад Ужгородський національний університет,
вул. Університетська, 14, 88000, Ужгород, Україна

(Одержано 30.04.2012, опубліковано online 04.06.2012)

Запропоновано фізично строге визначення контрасту електронномікроскопічних зображень аморфних наноматеріалів. Показана необхідність розділення вкладу в контраст різних видів розсіювання електронів атомами зразка: пружного когерентного, пружного некогерентного та непружного. Виведені прості аналітичні співвідношення для знаходження вкладу в електронномікроскопічний контраст трьох різних видів розсіювання.

Ключові слова: наноматеріали, аморфний, контраст, розсіювання, електрон, атом.

PACS numbers: 07.78. + s; 07.79. – v; 61.05.J –; 68.37.Lp; 87.64.Ee

1. ВСТУП

При дослідженні структури наноматеріалів широкі можливості надає сучасна електронна мікроскопія. Для неї характерні висока роздільна здатність на рівні окремих атомів, локальність аналізу на рівні одиниць нанометрів, оперативність, комплексність застосування різних методик, швидкість переходу від одного режиму спостереження до іншого, можливість моделювання різних зовнішніх впливів на зразок безпосередньо в колоні мікроскопа і багато іншого. Тому електронномікроскопічні (ЕМ) дослідження сьогодні дозволяють швидко і з достатнім ступенем вірогідності оцінити і кількісно виміряти цілий ряд важливих структурно-експлуатаційних параметрів наносистем [1 – 3]. Але в більшості випадків це відноситься до вивчення кристалічних об'єктів. У випадку неупорядкованих аморфних наноматеріалів кількісні ЕМ методи розвинуті набагато слабше і значно менше як теоретичних, так і експериментальних робіт присвячено аналізу даних питань. У переважній більшості сучасних публікації аналіз ЕМ зображень аморфних речовин проводиться на описовому рівні [4, 5]. Строгий же опис структури таких об'єктів передбачає визначення із ЕМ змін ряду кількісних параметрів. Особливо це відноситься до аморфних речовин складного хімічного складу. У таких зразках формування ЕМ зображень зумовлюється комплексною дією цілого ряду причин: наявністю атомів з різними розсіюючими здатностями електронів; можливістю локального фазового розділення з відмінністю різних фаз як по хімічному складу, так і по структурі; відмінністю дифракційних вкладів різних сусідніх локальних ділянок; варіацією геометричної товщини; локальними змінами атомної густини у зразку; наявністю нанопор; проявом високого рівня шумів; відсутністю чітких меж між елементами зображення; анізотропністю наноструктури; тощо. При формуванні ЕМ зображення вклади всіх відмічених особливостей структури аморфних наноб'єктів накладаються між собою, формуючи один тип контрасту, який називають амплітудним або абсорбційним. Тому знаходження методів

кількісного виділення їх ролі в утвореному загальному ЕМ контрасті є надзвичайно складним і актуальним науковим завданням. У даній роботі обґрунтовується загальне кількісне визначення амплітудного контрасту ЕМ зображень та аналізується можливість використання даного параметра для кількісного аналізу нано- та мікроструктури аморфних наносистем і наноматеріалів складного хімічного складу.

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

У фізиці та фотометрії використовують кілька різних значень терміну контраст: оптичний контраст, колірний контраст, діапазон яскравостей, контраст освітлення, контрастність зображення [6]. Тому для проведення кількісного аналізу ЕМ зображень слід дати чітке фізичне визначення такої важливої величини, як амплітудний ЕМ контраст та знайти прості й надійні методики його знаходження.

Різними дослідниками пропонуються різні визначення контрасту на ЕМ зображеннях об'єктів. При цьому під ЕМ контрастом завжди розуміється відмінність оптичних характеристик різних ділянок зображення. Часто порівняння цих характеристик проводиться відносно певної базової величини. Наприклад, у роботах [7, 8] такою базовою величиною прийнято інтенсивність падаючого електронного пучка I_0 . Але визначення контрасту дається різне. В [7] під контрастом розуміється натуральний логарифм відношення інтенсивності електронного пучка I , що пройшов через об'єкт і при цьому розсіявся в середині апертурного кута об'єктива, до його базової інтенсивності

$$K = \left| \frac{1}{\gamma} \right| \ln \left(\frac{I}{I_0} \right), \quad (1)$$

де γ – параметр, який враховує особливості середовища, яке використовується для реєстрації ЕМ зображення. В якості ж чисельної характеристики ЕМ контрасту [8] використовують величину, аналогічну величині оптичної видимості, введеної у фотометричну оптику Майкельсоном [9]:

$$K = \frac{I_0 - I}{I_0 + I} \quad (2)$$

* al-sv2006@newmail.ru

Визначення контрасту за співвідношеннями (1) та (2) у практичній електронній мікроскопії викликає значні труднощі. Вони пов'язані зі складністю експериментальної реєстрації інтенсивності I_0 і в дослідженнях наноматеріалів застосовуються досить рідко.

Найчастіше для кількісних вимірювань у сучасній електронній мікроскопії величину контрасту ЕМ зображень задають як зміну інтенсивності електронного пучка I_1-I_2 викликану його розсіюванням у середину апертурного кута в різних локальних ділянках об'єкта [10], тобто

$$K = \frac{I_1 - I_2}{I_1} = 1 - \frac{I_2}{I_1}, \quad (3)$$

Але і такий підхід до кількісного аналізу ЕМ зображень має суттєві недоліки. По-перше, величина K буде мати різні значення, в залежності від того, який елемент зображення ми чисто суб'єктивно позначимо першим, а який другим. По-друге, контраст за формулою (3) може бути як додатнім, так і від'ємним, у той час як за фізичним змістом він має мати строго додатне значення.

Таким чином, кількісний аналіз ЕМ зображень вимагає встановлення чіткого фізичного змісту величини ЕМ контрасту. Найбільш строге вирішення цього питання приводиться у фотометрії. В цьому розділі фізики контраст визначають як найбільшу відмінність в освітленості різних частин об'єкта:

$$K = \frac{B_{max} - B_{min}}{B_{max} + B_{min}}, \quad (4)$$

де B_{max} і B_{min} – максимальна та мінімальна освітленості [11]. З нашої точки зору, таке визначення контрасту найкраще підходить для використання і в області аналітичної електронної мікроскопії аморфних наноматеріалів. Тоді для ЕМ зображень в якості параметра B потрібно використовувати величину «освітленості» локальних ділянок реєструючого середовища – тобто інтенсивність формуючого ЕМ зображення електронного пучка I на цих ділянках. Отже, за аналогією із співвідношенням (4), контрастом між двома елементами ЕМ зображень будемо називати величину K , яка визначається таких виразом:

$$K = \frac{|I_1 - I_2|}{I_1 + I_2}, \quad (5)$$

де I_1 та I_2 – інтенсивності електронних пучків, які формують зображення двох локальних ділянок ЕМ зображення. Значення чисельника у формулі (5) взято за модулем, щоб при розрахунках величини контрасту не потрібно було встановлювати, котра із двох інтенсивностей I_1 та I_2 більша, оскільки за фізичним змістом контраст завжди має задаватися додатнім числом.

У сучасних електронних мікроскопах та пристроях фотометрування процес реєстрації та оцифрування знімків виконується таким чином, що забезпечується лінійна залежність між інтенсивністю формуючого електронного пучка та величиною оптичного «почорніння» на зображенні, викликаного даним пучком. Слід відмітити, що для багаторазових реєструючих пластинок та ССВ й ССІ матриць така залежність характерна практично для всього діапазону інтенсивностей формуючих зображення електронних пучків мікроскопа [12]. Для сучасних же електроннографічних

фотопластинок вона виконується лише в діапазоні малих оптичних почорнінь $D < 0,6-0,8$ (для більш ранніх фотопластинок $D < 0,3-0,4$).

Таким чином, у зв'язності від величини почорніння фотоматеріалу, слід використовувати різні математичні підходи для розрахунків контрасту. Конкретне застосування співвідношення (5) в кількісному аналізі ЕМ зображень визначається типом реєструючого середовища електронного мікроскопа. На сьогодні основними із них є [12]: традиційні фотопластинки, фосфорні багаторазові реєструючі пластинки, електронні матриці. Перші два види середовищ дають вищу роздільну здатність та контрастність ЕМ зображень, але для оцифрування вимагають проведення спеціальної процедури фотометрування. Два останні види реєструючих пристроїв представляють зображення безпосередньо у вигляді комп'ютерного файлу, записаного в тому або іншому форматі збереження зображень. При цьому рівень чорного кожного пікселя записаного знімку відповідає інтенсивності електронного пучка, який формував цей піксель зображення. Тому для визначення величини контрасту таких зображень слід використовувати безпосередньо вираз (5).

У випадку малих почорнінь фотопластинок інтенсивність електронного пучка, який формує зображення, пропорційний цьому почорнінню, тобто $I = cD$, де c – коефіцієнт пропорційності. Якщо почорніння визначається з результатів фотометрування фотопластинок, то за визначенням [4],

$$D = \lg\left(\frac{\Phi_0}{\Phi}\right), \quad (6)$$

де Φ_0 – світловий потік, який падає на фотометровану фотопластинку, а Φ – світловий потік, який виходить із фотопластинки і величина якого реєструється світлочутливими елементами. Оскільки сигнал із реєструючих світлочутливих елементів мікрофотометра пропорційний потоку Φ , та можна вважати, що цифровий файл, який ми отримуємо в результаті фотометрування ЕМ зображення, задає двохмірний розподіл цього потоку. Тому саме через величину цього потоку слід визначати контраст ЕМ зображень. При прийнятих умовах контраст ЕМ зображення на фотопластинках буде рівний:

$$K = \frac{|\lg\frac{\Phi_0}{\Phi_1} - \lg\frac{\Phi_0}{\Phi_2}|}{\lg\frac{\Phi_0}{\Phi_1} + \lg\frac{\Phi_0}{\Phi_2}} = \frac{|\lg\Phi_2 - \lg\Phi_1|}{2\lg\Phi_0 - \lg\Phi_1 - \lg\Phi_2}, \quad (7)$$

Більш складним отримується вираз для контрасту ЕМ зображень на фотопластинках, коли величина почорніння знаходиться в області D від 0,3 до 2. Тут зв'язок інтенсивності формуючого зображення електронного пучка і почорніння слід записати у вигляді $D = \delta \lg(I_T)$. Порівнюючи цей вираз із співвідношенням (6), можемо записати:

$$\frac{\Phi_0}{\Phi} = (I_T)^\tau = I^\tau \tau^\delta, \quad (8)$$

або

$$I = \left(\frac{\Phi_0}{\Phi \tau^\delta}\right)^{1/\delta} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{\Phi_0}{\Phi}\right)^{1/\delta}, \quad (9)$$

Тоді для величини контрасту таких ділянок ЕМ фотогографічних зображень можна записати формулу:

$$K = \frac{\frac{1}{\tau} \frac{|\Phi_0^{1/\delta} - \Phi_1^{1/\delta}|}{\Phi_1^{1/\delta} + \Phi_2^{1/\delta}}}{\frac{1}{\tau} \frac{|\Phi_0^{1/\delta} - \Phi_1^{1/\delta}|}{\Phi_1^{1/\delta} + \Phi_2^{1/\delta}}} = \frac{|\Phi_2^{1/\delta} - \Phi_1^{1/\delta}|}{\Phi_1^{1/\delta} + \Phi_2^{1/\delta}} = \frac{|\Phi_2^{1/\delta} - \Phi_1^{1/\delta}|}{\Phi_2^{1/\delta} + \Phi_1^{1/\delta}}, \quad (10)$$

Як видно зі співвідношень (7) та (10), двом різним діапазнам почорніння фотопластинок відповідають суттєво різні методики визначення числових значень контрасту. В першому випадку при оцифруванні ЕМ зображень крім фотометрування самої фотопластинки слід проводити вимірювання і величини світлового потоку, який направляється на фотометровану пластинку (див. вираз (7)). Для цього експериментально ми проводили процедуру фотометрування світлового поля освітленого столика без розміщеної на ньому фотопластинки. За результатами такого сканування визначалося середню значення Φ_0 падаючого на фотопластинку світлового потоку. У другому ж випадку таке сканування можна було не проводити (див. вираз (10), але воно використовувалося нами для оцінки рівномірності розподілу падаючого світлового потоку по всій площі фотометрованого ЕМ зображення. Відмітимо, що незалежно від того, на якому носії було зареєстровано ЕМ зображення (фотопластинка чи електронна матриця) і в якій області почорнінь проводяться вимірювання, задана формулою (5) величина контрасту буде лежати в діапазоні від 0 до 1 відносних одиниць.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Проаналізуємо особливості використання запропонованої вище величини ЕМ контрасту для кількісного аналізу нано- та мікроструктури аморфних матеріалів складного хімічного складу. Відмітимо, що в таких об'єктах ЕМ зображення формується за рахунок розсіювання на досліджуваному зразку електронів зондуєчого пучка в межах апертурної діафрагми з апертурним кутом α . При цьому для аналізу слід виділяти три типи розсіювання: пружне когерентне, пружне некогерентне та непружне. Інтенсивність електронного пучка, який формує ЕМ зображення локальної ділянки об'єкта за рахунок певного механізму [12]

$$I = I_0 \exp(-\bar{\sigma} \rho_0 d), \quad (11)$$

де, $\bar{\sigma}$ – повний усереднений переріз розсіювання електронів локальною ділянкою за відповідним механізмом в межах апертурної діафрагми, ρ_0 – усереднена атомна густина даної локальної ділянки, а d – її геометрична товщина.

Позначимо інтенсивності електронних пучків, які формують зображення локальної ділянки зразка за рахунок відмічених трьох видів розсіювання через $I_{пк}$, $I_{пн}$ та I_n , відповідно. Тоді загальна інтенсивність розсіювання електронів локальною ділянкою буде рівна сумі трьох інтенсивностей:

$$I = I_{пк} + I_{пн} + I_n, \quad (12)$$

Підставляючи цей вираз для сумарної інтенсивності розсіювання електронів двома локальними ділянками у співвідношення (5) отримаємо:

$$K = \frac{|I_{пк} + I_{пн} + I_n - I_{пк} - I_{пн} - I_n|}{I_1 + I_2} =$$

$$= \frac{|I_{пк} - I_{пк} + I_{пн} - I_{пн} + I_n - I_n|}{I_1 + I_2} = K_{пк} + K_{пн} + K_n, \quad (13)$$

де $K_{пк} = \frac{|I_{пк} - I_{пк}|}{I_1 + I_2}$, $K_{пн} = \frac{|I_{пн} - I_{пн}|}{I_1 + I_2}$, $K_n = \frac{|I_n - I_n|}{I_1 + I_2}$, – долі контрасту, зумовлені різними видами розсіювання електронів в об'єкті.

Аналіз виразу (13) свідчить про те, що величина контрасту на ЕМ зображення складається із трьох складових. При цьому дані складові не є незалежними між собою. У знаменник кожної складової входить загальний параметр $(I_1 + I_2)$, який задається сумарними інтенсивностями трьох видів розсіювання електронів. Тому параметри $K_{пк}$, $K_{пн}$, K_n не є контрастами зображень, зумовленими кожним видом розсіювання по окремо. Такі величини слід було б задати у вигляді:

$$K'_{пк} = \frac{|I_{пк} - I_{пк}|}{I_{пк} + I_{пк}}, K'_{пн} = \frac{|I_{пн} - I_{пн}|}{I_{пн} + I_{пн}}, K'_n = \frac{|I_n - I_n|}{I_n + I_n} \quad (14)$$

При цьому в рамках строгого розгляду в загальному випадку $K \neq K' \neq K'_{пк} + K'_{пн} + K'_n$. А тому при практичному дослідженні контрасту ЕМ зображень до уваги слід брати всі його складові $K_{пк}$, $K_{пн}$, K_n , $K'_{пк}$, $K'_{пн}$, K'_n та сумарні значення K' і K .

Визначення введених величин контрасту для речовин складного хімічного складу вимагає проведення двох основних операцій:

1. Усереднення відповідних диференціальних перерізів розсіювання електронів по всіх хімічних елементах досліджуваного зразка.
2. Інтегрування інтенсивностей пружно когерентно, пружно некогерентно та непружно розсіяних електронів в межах апертурного кута об'єктивної лінзи електронного мікроскопа.

Кожну з цих операцій можна проводити або теоретично, або експериментально. Проведений нами аналіз свідчить [12], що для одних видів контрасту оптимальним є теоретичний розрахунок, а для інших видів контрасту більш адекватним є використання експериментальних електроннограм. Проаналізуємо ці питання для кожного виду розсіювання окремо.

Контраст від пружного некогерентного розсіювання. Він може виникнути внаслідок варіації одного із трьох структурних параметрів локальних ділянок досліджуваного зразка: геометричної товщини, хімічного складу та ступеня нанопористості. Тому кількісний аналіз має включати розгляд всіх цих трьох величин. Вплив на контраст хімічного складу локальної ділянки досліджуваного зразка визначається базовими характеристиками взаємодії електронів з атомами речовини – атомними амплітудами розсіювання. Слід відмітити, що ці амплітуди є визначальним параметром для аналізу всіх трьох видів розсіювання електронів. Тому, з нашої точки зору, використання довідникових значень атомних електронних амплітуд $F(s)$ є оптимальним методом визначення вкладу в контрасту $K_{пн}$ варіацій хімічного складу зразка за рахунок зміни ефективного перерізу пружного некогерентного розсіювання електронів $\bar{\sigma}_n = \lambda^2 / 8\pi \int_0^\alpha F^2(s) ds$.

Вихідною точкою такого аналізу має бути експериментальне визначення розподілу різних хімічних елементів в локальних ділянках зразка. Такі дослідження сьогодні легко виконуються на сучасних скануючих електронних мікроскопах-аналізаторах, які забезпечу-

ють локальність аналізу в десятки нанометрів з точністю до 5 % [5]. Їхні результати дозволяють експериментально встановити відносні долі різних хімічних елементів у складі тієї чи іншої локальної ділянки зразка. Якщо такі долі відрізняються для двох досліджуваних локальних ділянок, та це буде вносити вклад у контраст між відповідними елементами ЕМ зображення.

Для встановлення можливості вкладу в контраст різних геометричних товщин локальних ділянок зразка, слід крім ЕМ досліджень провести вивчення профілю поверхні об'єкта за допомогою нанопрофілографа або атомно-силового мікроскопа. Якщо різні локальні ділянки об'єкта мають і різну ступінь нанопористості, то вони будуть відрізнятися усередненою атомною густиною ρ . Наявність таких відмінностей можна встановити, зареєструвавши темнопольні ЕМ зображення зразка, отримані при різному положенні апертурної діафрагми поблизу центрального пучка. Якщо результати даних експериментів встановлять різну ступінь нанопористості локальних ділянок, то їм слід приписати різні атомні густини ρ_{01} та ρ_{02} .

Використовуючи весь комплекс отриманих результатів, можна отримати кількісні величини вкладу контрасту за рахунок пружного некогерентного розсіювання електронів. Зокрема, для сучасних реєструючих пластин, з врахуванням виразів (5) та (12), отримаємо:

$$K_{\text{пн}} = \frac{|\exp(-\bar{\sigma}_{\text{н1}}\rho_{01}d_1) - \exp(-\bar{\sigma}_{\text{н2}}\rho_{02}d_2)|}{\exp(-\bar{\sigma}_{\text{н1}}\rho_{01}d_1) - \exp(-\bar{\sigma}_{\text{н2}}\rho_{02}d_2)}, \quad (15)$$

Контраст від пружного когерентного розсіювання. Оскільки структура атомної сітки досліджуваного зразка нам невідома, то визначення контрасту за рахунок пружного когерентного розсіювання $K_{\text{пк}}$ або $K'_{\text{пк}}$ можливе лише експериментальними методами. Ефективний переріз пружного когерентного розсіювання електронів атомами локальної ділянки зразка складного хімічного складу задається таким математичним виразом:

$$\sigma_{\text{к}} = \frac{\lambda^2}{8\pi} \int_0^\alpha F^2(s)S(s)ds \quad (16)$$

де $S(s)$ – структурний фактор атомної сітки локальної ділянки, який експериментально визначається методами нанодифракції електронів. Відповідно, кількісна величина вкладу контрасту за рахунок пружного коге-

рентного розсіювання електронів знаходиться зі співвідношення (15), в якому замість ефективних перерізів $\bar{\sigma}_{\text{н}}$ підставлено перерізи $\sigma_{\text{к}}$ локальних ділянок об'єкта досліджень.

Контраст від непружного розсіювання. Вклад у контраст непружно розсіяних електронів $K_{\text{н}}$ можна знайти як теоретично, так і експериментально. Але, враховуючи значні труднощі в теоретичних розрахунках атомних перерізів непружного розсіювання електронів та в їх сильній залежності від реальних умов реєстрації електронів, більш надійні та достовірні результати має давати експериментальний метод знаходження величини $K_{\text{н}}$. В такому випадку ефективний переріз даного виду розсіювання $\sigma_{\text{н}} = \lambda^2/8\pi \int_0^\alpha \varphi(s)ds$, де $\varphi(s)$ – експериментально визначена функція розподілу інтенсивності некогерентного фону в межах апертурної діафрагми. Відповідно, кількісна величина вкладу в контраст ЕМ зображень за рахунок непружного розсіювання:

$$K_{\text{н}} = \frac{|\exp(-\sigma_{\text{н1}}\rho_{01}d_1) - \exp(-\sigma_{\text{н2}}\rho_{02}d_2)|}{\exp(-\sigma_{\text{н1}}\rho_{01}d_1) - \exp(-\sigma_{\text{н2}}\rho_{02}d_2)}, \quad (17)$$

При наявності у досліджуваному зразку локальних ділянок, які по різному розсіюють електрони за трьома механізмами, кількісна величина контрасту ЕМ зображень буде визначатися сумою всіх трьох вкладів, відповідно із співвідношеннями (15), (16) та (17).

4. ВИСНОВКИ

Для кількісного аналізу електронномікроскопічних зображень слід застосовувати фізично строге визначення електронного контрасту, величина якого не залежить від інтенсивності зондуючого пучка електронного мікроскопа. Використання такого визначення в аналітичній електронній мікроскопії вимагає розділення вкладу в контраст різних видів розсіювання електронів атомами зразка в межах апертурної діафрагми: пружного когерентного, пружного некогерентного та непружного. Запропоновані прості аналітичні співвідношення для знаходження величини вкладу в електронномікроскопічний контраст цих трьох видів розсіювання.

Количественное определение контраста электронных изображений аморфных наноматериалов сложного химического состава

М.Ю. Бобик, В.П. Іваницький, В.С. Ковтуненко, О.Я. Сватюк

Государственное высшее учебное заведение Ужгородский национальный университет,
ул. Университетская, 14, 88000, Ужгород, Украина

Предложено физически строгое определение контраста электронно изображений аморфных наноматериалов. Показана необходимость разделения вклада в контраст различных видов рассеивания электронов атомами образца: упругого когерентного, упругого некогерентного и неупругого. Выведены простые аналитические соотношения для нахождения вклада в электронномикроскопический контраст трех различных видов рассеивания.

Ключевые слова: наноматериалы, аморфный, контраст, рассеивание, электрон, атом.

Quantitative Detection of the Contrast of Electron Microscopic Images of Amorphous Nanomaterials with the Complex Chemical Composition

M.Y. Bobyk, V.P. Ivanytskiy, V.S. Kovtunenکو, O.Y. Svatyuk

State higher education institution Uzhhorod national university, Universytetska str.14, 88000, Uzhhorod, Ukraine

Physically strict detection of the contrast of electron microscopic images of amorphous nanomaterials has been proposed. The necessity of separation of the contribution to the contrast of different types of electron scattering by sample atoms, namely, resilient coherent, resilient non-coherent, and non-resilient, has been revealed. Simple analytical correlations for the determination of the contribution to the electron microscopic contrast of three different scattering types have been deduced.

Keywords: Nanomaterials, Amorphous, Contrast, Scattering, Electron, Atom.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. G. Lukovsky, M. Popescu, *Non-Crystalline Materials for Optoelectronics* (Bucharest: INOE publishing house, 2004. V.1.).
2. M. Popescu, *Physics and application of disordered materials* (Bucharest: JNOE publishing house, 2002.).
3. Д. Брандон, У. Каплан *Микроструктура матеріалів. Методи дослідження і контролю*, (Издательство: Техносфера 2004.)
4. Д.В. Штанский *Просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения в нанотехнологических исследованиях* (Ж.Рос. хим. об-ва им. Д.И.Менделеева, 2002. Т. XLVI, №5.).
5. M. Watt Ian *The principles and practice of electron microscopy* (1997.)
6. К.А. Августиневич *Основы фотографической метрологии*. (М.: Легпромбытиздат. 1990. ISBN 5-7088-0301-0.)
7. А.Н. Пилянкевич *Просвечивающая электронная микроскопия* (К.: Наукова думка. 1975.).
8. David C. Joy, Alton D. Romig, Joseph Goldstein *Principles of analytical electron microscopy* (1986.).
9. М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики*. (М.: Наука, 1970).
10. Peter J. Goodhew, F.J. Humphreys, R. Beanland *Electron microscopy and analysis* (NY: Taylor & Francis, 2001.).
11. *Физический энциклопедический словарь* (М.: Советская энциклопедия, 1984.).
12. J.M. Zuo, *Electron detection characteristics of a slow-scan CCD camera, imaging plates and electron image resolution*, (Microscopy research and technique. 2000. 49:245-268.).
13. М.Ю. Бобик, Є.І. Боркач, В.П. Іваницький, В.І. Сабов, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології* 9, № 4 (2001).