

УДК 378.147: 372.853
DOI 10.31494/2412-9208-2022-1-1-55-64

**PROFESSIONAL ACTIVITY OF A SPECIALIST IN THE FIELD OF
NANOMATERIALS TO CREATE NANOSTRUCTURES
ON THE SURFACE OF SEMICONDUCTORS**

**ПРОФЕСІЙНА ДІЯЛЬНІСТЬ ФАХІВЦЯ В ГАЛУЗИ
НАНОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ЗІ СТВОРЕННЯ НАНОСТРУКТУР
НА ПОВЕРХНІ НАПІВПРОВІДНИКІВ**

Iryna BARDUS,
Doctor of Pedagogical Sciences,
Professor

Ірина БАРДУС,
доктор педагогічних наук,
професор

irina.bardus@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-8682-7791>

Sergiy KOVACHOV,
Researcher

Сергій КОВАЧОВ,
науковий співробітник

essfero@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-0212-1255>

Ihor BOHDANOV,
Doctor of Pedagogical Sciences,
Professor

Ігор БОГДАНОВ,
доктор педагогічних наук,
професор

BogdanovBDPU@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-3035-7989>

Yana SUCHIKOVA,
Doctor of Technical Sciences,
Professor

Яна СИЧІКОВА,
доктор технічних наук, професор

yanasuchikova@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-4537-966X>

*Berdiansk State Pedagogical
University,
✉ 4, Schmidt st., Berdiansk,
Zaporizhzhia region, 71100*

*Бердянський державний
педагогічний університет,
✉ вул. Шмідта, 4, м. Бердянськ,
Запорізька обл., 71100*

Original manuscript received: May 31, 2022

Revised manuscript accepted: June 08, 2022

ABSTRACT

The article is devoted to the topical problem of improving the quality of professional training of future specialists in the field of nanomaterials to productive activities, namely the analysis of his professional activities to create nanostructures on the surface of semiconductors. The article analyzes the objects, products, tools, processes, and conditions of professional activity of a specialist in the synthesis of nanostructures on the surface of semiconductors and identifies the properties of the original and synthesized nanomaterial, conditions, technologies, means of their creation. Factors that affect the characteristics of nanostructures during their synthesis (resource, technological), properties of source and synthesized nanomaterials (physical, chemical, biological, morphological, environmental, mechanical, technological, patent law, economic and functional) are described. The most popular methods (chemical,

electrochemical etching, lithography) and means of synthesis of nanostructures on the surface of a semiconductor wafer are presented.

Based on the generalized structure of the production process, defined the content of the nanoengineer's professional activity on the organization of the nanomaterials production process (identification of correlations between conditions and synthesis results, selection of optimal technological solutions, experimentation, preparation of experimental methods by chemical reactions, synthesis conditions); on the implementation of the technological process (design of future nanomaterial, its manufacture and improvement); on production process management (taking into account the influence of factors on characteristics, resource planning, assessing the correct choice of materials, modes, methods, and regulating the synthesis process by conducting similar studies on other samples, analysis of previously unaccounted factors, adjusting synthesis conditions, resources, eliminating unwanted phenomena).

Key words: *nanotechnologies, professional activity, production process, system approach, nanoengineer.*

Вступ. Нанотехнології є однією з найбільш динамічних галузей досліджень і розробок, що відіграють важливу роль як у фундаментальній, так і в прикладній науці, тому для забезпечення конкурентоспроможності своїх випускників заклади вищої освіти мають постійно оновлювати зміст підготовки майбутніх нанотехнологів, ураховуючи динамічність нанотехнологічної галузі. Зміст підготовки за тією чи іншою освітньою програмою будується на основі визначених кваліфікаційних вимог до майбутнього фахівця в галузі наноматеріалознавства. Об'єктивне визначення кваліфікаційних вимог до майбутнього нанотехнолога можливе тільки на основі досліджень структури його праці при здійсненні виробничого процесу [4] зі створення наноматеріалів для конкретної галузі застосування (медицина, електроніка, енергетика, екологія, будівництво, харчова промисловість, текстильна промисловість, тощо). Так, для визначення вимог до професійної компетентності фахівця в галузі наноелектроніки необхідно розглянути процес створення наноструктур на поверхні напівпровідників.

На основі аналізу досліджень учених-педагогів (С. Величко, Н. Валько, С. Даньшева О. Завражна, Т. Куценко, М. Михайлюк, Г. Подус, Ю. Ткаченко, Г. Шойнбаєва, В. Шароценко, Д. Череднік), присвячених теоретичним та методичним засадам професійної підготовки майбутніх фахівців у галузі наноматеріалознавства за різними освітніми програмами у закладах вищої освіти, можна констатувати, що на сьогодні зміст підготовки цих фахівців побудований на досить поверховому та несистемному аналізі процесу виробництва наноматеріалів і не відображає специфіки синтезу наноструктур на функціональних матеріалах різної природи. Для усунення цієї проблеми, на нашу думку, необхідно застосувати системний підхід до аналізу професійної діяльності фахівця в галузі наноматеріалознавства, який би дозволив урахувати всі наявні технології та засоби створення наноматеріалів, а також перевірки рівня їхньої якості для конкретної галузі застосування.

Метою статті є визначення видів та змісту професійної діяльності фахівця в галузі наноматеріалознавства зі створення наноструктур на поверхні напівпровідників.

Методи та методики дослідження. Для аналізу професійної діяльності фахівця в галузі наноматеріалознавства зі створення наноструктур на поверхні напівпровідників доцільно використати узагальнену структуру виробничого процесу [1, 6], запропоновану В. Саловим [4]. Відповідно до неї створення будь-якого продукту, в тому числі і наноматеріалу, передбачає виконання фахівцем діяльності з організації технологічних процесів, безпосередньої їх реалізації та управління виробництвом. Залежно від посадових обов'язків об'єктом діяльності фахівця можуть бути всі елементи узагальненої структури виробничого процесу або їх частина.

Під час аналізу діяльності фахівця необхідно розглянути [4]: 1) *предмет* діяльності – те, що суб'єкт має до початку своєї діяльності і що підлягає трансформації в продукт, у нашому дослідженні – це функціональний матеріал – напівпровідник; 2) *засіб* діяльності – об'єкт, що опосередковує вплив суб'єкта на предмет діяльності (обладнання, електроліти); 3) *процес* – технологія одержання продукту праці; 4) *умови* – характеристика оточення суб'єкта в процесі діяльності (освітленість приміщення, температура розчину електроліту, чистота експерименту); 5) *продукт* – те, що одержано в результаті трансформації предмета в процесі діяльності (нова наноструктура на поверхні напівпровідника).

Результати та дискусії. Розглянемо продуктивну професійну діяльність фахівця в галузі наноматеріалознавства (інженера-нанотехнолога, наноінженера) спрямовану на створення принципово нових наноматеріалів.

Інженер-нанотехнолог виконує професійні завдання, пов'язані з нанотехнологіями та суміжними галузями, вирішує технологічні та наукові проблеми, пов'язані з виробництвом та застосуванням наноструктур [2, 3, 5].

Предметом професійної діяльності наноінженера, що створює наноматеріали для використання в електроніці, техніці та енергетиці, є напівпровідники (найчастіше монокристалічні, такі, як фосфід індію, фосфід галію, арсенід галію, кремній, германій тощо) [5, 7].

Продуктом діяльності наноінженера є синтезований наноматеріал, отриманий у результаті наноструктурування поверхні напівпровідника з метою надання йому нових властивостей.

Будь-якому наноматеріалу притаманні різні фізичні, хімічні, біологічні, морфологічні, екологічні та механічні властивості. Крім того, синтезовані матеріали можна класифікувати за технологічними, патентно-правовими, економічними та функціональними показниками.

До фізичних властивостей наноматеріалів належить множина властивостей речовини / матеріалу нехімічної взаємодії (магнітні: проникність, точка Кюрі, петля гістерезису, намагніченість, блокувальний розмір, магнітна опірність; електричні: діалектичні втрати, діалектична провідність, опір, мобільність електронів, рівень Фермі, коефіцієнт Хола; оптичні: індекс рефракції, коефіцієнт прозорості, абсорбційна здатність, відбивальна здатність, освітленість, люмінесценція; термічні: теплопровідність, термічна деградація, теплове лінійне розширення, теплоємність, теплота сублимації, теплота реакції; акустичні: коефіцієнт

акустичного згасання, акустичний питомий опір, акустична абсорбція, швидкість проходження звуку, акустичні втрати, реверберація).

Фізичні властивості наноматеріалу узгоджені з механічними властивостями, серед яких найважливішими є: міцність, пружність, пластичність, твердість.

Біологічні властивості наноматеріалів зумовлюються: здатністю матеріалу чинити опір руйнівній дії мікроорганізмів; взаємодією із середовищем, у якому вони знаходяться. У цьому сенсі біологічні властивості узгоджуються з екологічними показниками, які слід розглядати протягом всього життєвого циклу наноматеріалу.

Хімічні властивості наноматеріалів зумовлюються елементарним складом поверхні й повинні містити оцінку щодо однорідності цього складу.

До економічних показників належать ті, що пов'язані з витратами ресурсів і окупністю від провадження діяльності. Економічні показники мають кореляцію з технологічними показниками, оскільки від складності технологічного процесу залежать витрати на виробництво. Крім того, показники витрат дуже часто є суперечливими до морфологічних властивостей поверхні, бо покращення морфологічних властивостей можливе лише за рахунок ускладнення технологічного процесу та використання більш вартісної сировини.

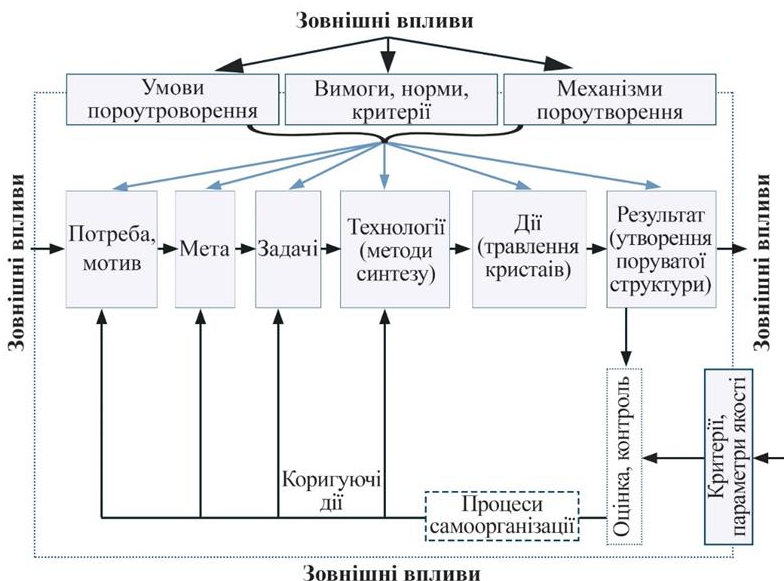


Рис. 1 Узагальнена структурно-функціональна модель процесу створення поруватої структури на поверхні напівпровідника

Функціональний показник наноматеріалу визначається як його функціональна придатність, тобто набір атрибутів, що зумовлює

призначення, основні необхідні й достатні функції, задані технічним завданням або вимогами споживача.

Фізичні, біологічні, механічні властивості, а також екологічні, економічні, патентні, функціональні показники є загальними для всього набору зразків, синтезованих за однакових умов. Вони характеризують характеристики матеріалу загалом. Специфічними для кожного окремого зразка є морфологічні та хімічні властивості, які можуть істотно різнитися для зразків однієї партії та характеризують якість наноматеріалу.

Основними морфологічними характеристиками наноструктур на макрорівні є: розподіл за діаметром пор, товщина поруватого шару, наявність дефектів, поруватість, рівномірність розподілу по поверхні; та на мікрорівні – діаметр пори, довжина пори, фактор форми/ округлість, орієнтація пор.

Отже, розглянемо процес перетворення предмета професійної діяльності фахівця в галузі наноматеріалознавства (наноінженера) на продукт, а саме – процес створення поруватої структури на поверхні напівпровідника [5] (рис. 1).

Створення наноструктур кристалу починається з потреби, зумовленої необхідністю отримання наноматеріалів із заданими властивостями [5]. Для задоволення потреби необхідно сформулювати мету, яка в нашому випадку постає у формуванні пор на поверхні напівпровідникової пластини.



Рис. 2 Чинники, які впливають на характеристики наноструктур під час їх синтезу

З урахуванням умов, вимог, норм і принципів діяльності мета конкретизується в набір задач. Задачами є встановлення таких технологічних режимів, при яких стає можливим отримання наноструктур із заданим рівнем якості. Це можливо лише за умови контрольованості технологічного процесу

та розуміння основних механізмів, що лежать в основі пороутворення. У цьому контексті насамперед необхідно визначитися з методами синтезу наноструктур, що включають урахування додаткових умов та впливів зовнішніх факторів (ресурсних і технологічних чинників (рис. 2)).

Ресурсними чинниками є: стан і параметри вихідного напівпровідника, концентрація і склад електроліту та додаткові ресурси, які були витрачені під час синтезу. До технологічних чинників належать умови та режими експерименту, застосоване обладнання. Також необхідним є врахування таких чинників, як кваліфікація персоналу та дотримання режимів обробки, встановлені робочою документацією (технічним завданням, технологічним маршрутом, процедурою тощо).

Далі відбувається безпосередній синтез наноструктур на поверхні напівпровідникової пластини за одним із обраних методів (хімічного, електрохімічного, фотоелектрохімічного травлення, електрохімічного осадження, термічного відпалу, комбінованих методів) [5; 7].

Метод хімічного травлення реалізується зануренням напівпровідника в селективний травник на тривалий час.

Електрохімічне травлення є різновидом хімічного травлення, але відрізняється тим, що під час травлення зразки піддаються дії електричного струму. У результаті цієї обробки на поверхні напівпровідників формується поруватий шар.

Метод літографії та фотолітографії реалізується нанесенням на поверхню кристалу шаблону (маски), а далі проводиться звичайне електрохімічне травлення.

Реалізацію цих методів забезпечують шляхом застосування певного обладнання, пристроїв (електрохімічна комірка, устаткування для термічного відпалу, пристрій для іонного бомбардування пластин, вакуумні камери тощо).

Для оцінки результату отримані наноструктури порівнюють з еталонними за заздалегідь визначеними критеріями якості. При цьому вибір критеріїв зазвичай диктується цілями оцінки, яка відбувається на основі аналізу дослідження поверхні кристалу. Бажаним є використання неруйнівних методів контролю, якими можуть виступати сканувальна електронна мікроскопія (SEM), метод хімічного аналізу поверхні кристалів (EDAX), рентгенівська спектроскопія, фотолюмінесценція (FL) тощо [5].

Залежно від отриманого результату синтез наноструктур можна коригувати. До таких дій можна віднести: підігрів/охолодження електроліту; перемішування електроліту; освітлення зразків під час травлення тощо. Використання коригувальних дій має вирішувати завдання покращення показників і доведення результату до еталонного значення.

Наступним кроком на основі розглянутого процесу створення наноструктур на поверхні напівпровідників визначимо види та зміст професійної діяльності наноінженера під час реалізації ним відповідного виробничого процесу.

Відповідно до узагальненої структури будь-якого виробничого процесу [4] синтез наноструктур на поверхні напівпровідників здійснюється в результаті виконання наноінженером професійної

діяльності з організації, технології та управління процесом виробництва (рис. 3).

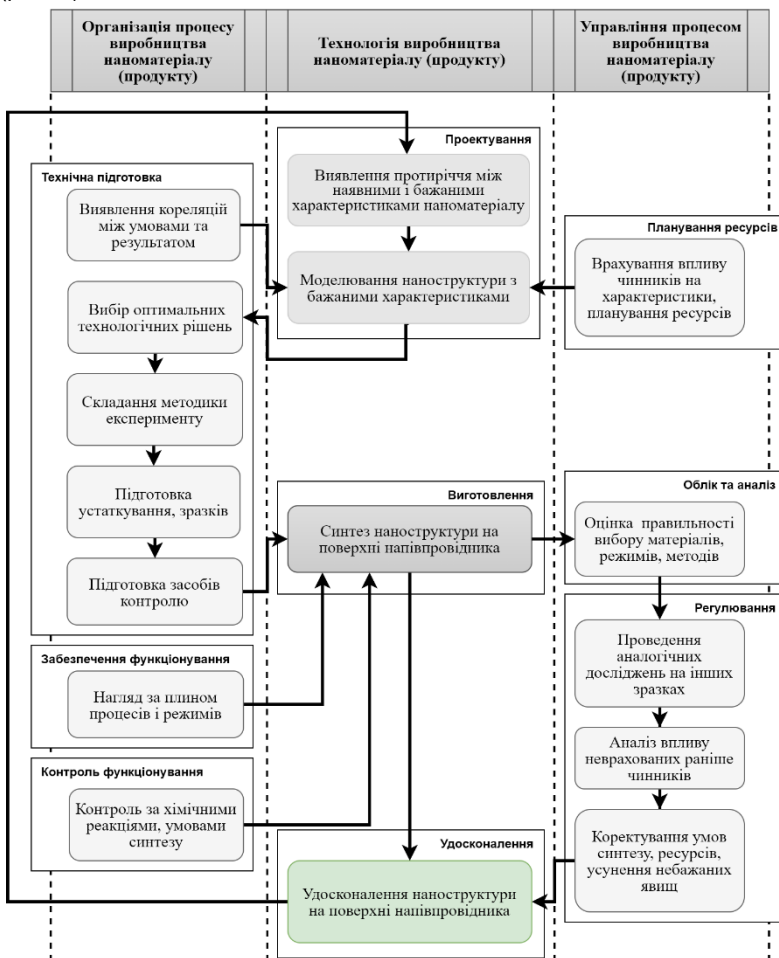


Рис. 3 Система професійної діяльності nanoінженера із синтезу наноструктур на поверхні напівпровідників

Професійна діяльність nanoінженера з організації процесу виробництва наноматеріалів передбачає виконання ним дій з технічної підготовки, забезпечення і контролю функціонування процесу синтезу наноструктур на поверхні напівпровідника.

Дії nanoінженера з організації процесу виробництва наноматеріалів полягають у виявленні кореляцій між умовами та результатом синтезу, виборі

оптимальних технологічних рішень, складанні методики експерименту, підготовки устаткування, зразків та засобів контролю, нагляді за плином процесів і режимів, контролі за хімічними реакціями, умовами синтезу.

Професійна діяльність наноінженера *із реалізації технологічного процесу* виробництва наноматеріалів передбачає: проектування майбутнього наноматеріалу (виявлення протиріччя між наявними та бажаними характеристиками наноматеріалу, моделювання наноструктури з бажаними характеристиками), його виготовлення (синтезу наноструктури на його поверхні), за необхідності вдосконалення та утилізацію.

Професійна діяльність наноінженера *з управління виробничого процесу* синтезу наноструктур передбачає: врахування впливу чинників на характеристики, планування ресурсів, оцінку правильності вибору матеріалів, режимів, методів, а також регулювання процесу синтезу шляхом: проведення аналогічних досліджень на інших зразках, аналіз впливу не врахованих раніше чинників, коригування умов синтезу, ресурсів, усунення небажаних явищ.

Отже, узагальнюючи все сказане вище, можна сформулювати основні професійні обов'язки інженера-нанотехнолога [3, 5]:

- створення, тестування та аналіз різних типів наноструктур на поверхні напівпровідника з використанням сучасного дослідницького та вимірювального обладнання;
- проектування та конструкція пристроїв і систем для проведення нанометричних досліджень і вимірювань;
- розробка технологій досягнення необхідних значень фізико-технічних параметрів синтезованих наноматеріалів у процесі виробництва;
- встановлення принципів і закономірностей, на яких ґрунтується система управління процесом формування пор на поверхні напівпровідників;
- планування та проведення експериментів та критичного аналізу результатів вимірювань наноструктур;
- формулювання висновків щодо проведених експериментів і досліджень в області нанотехнологій;
- проведення достовірної та професійної оцінки тенденцій на ринку нанопродукції та вживання заходів з їх комерціалізації;
- дотримання в роботі принципів охорони праці, техніки безпеки, протипожежного захисту та охорони навколишнього середовища.

Висновки. На основі аналізу предметів, продуктів, засобів, процесу та умов професійної діяльності фахівця в галузі наноматеріалознавства зі створення наноматеріалів нами системно розглянуто процес синтезу наноструктур на поверхні напівпровідників і визначено властивості функціонального та синтезованого наноматеріалу, умови, технології і засоби їх створення, що є змістом професійної підготовки цих фахівців у закладах вищої освіти.

Проведений аналіз процесу створення наноструктур на поверхні напівпровідників на основі узагальненої структури виробничого процесу (за В. Саловим) дозволив визначити види та зміст професійної діяльності наноінженера як основи його організаційної, технологічної, проектувальної, науково-дослідної та інших професійних компетентностей.

Подальші дослідження пов'язуємо із розробкою системи професійних компетентностей фахівців у галузі наноматеріалознавства, а також змісту їхньої професійної підготовки у закладах вищої освіти.

Подяка

Дослідження проведено завдяки підтримці Міністерства освіти на науки України, а саме реалізації держбюджетних наукових проєктів:

- № 0122U000129 «Пошук оптимальних умов синтезу наноструктур на поверхні напівпровідників АЗВ5, А2В6 і кремнію для фотоники і сонячної енергетики»,

- № 0121U109426 «Теоретико-методичні засади системної фундаменталізації підготовки майбутніх фахівців у галузі наноматеріалознавства до продуктивної професійної діяльності».

Також Я. Сичікова висловлює подяку Goethe-Institut за підтримку за програмою екстрених стипендій для випускників програм «House of Europe». Ми також дякуємо Збройним Силам України за забезпечення безпеки для виконання цієї роботи. Ця робота стала можливою лише завдяки стійкості та мужності Української Армії.

Література

1. Бардус І. О. Фундаменталізація професійної підготовки майбутніх фахівців у галузі інформаційних технологій до продуктивної діяльності: монографія. Харків : ПромАрт, 2018. 393 с.

2. Довідник кваліфікаційних характеристик професій працівників. Вип. 1. Професії працівників, що є загальними для всіх видів економічної діяльності. Розділ 1. Професії керівників, професіоналів, спеціалістів та технічних службовців / уклад. Я. Кавторева. Харків : Фактор, 2008. 384 с.

3. Професії. Інженер-нотехнолог. [Електронний ресурс]. URL: <https://osvita.ua/proforientation/profession/74269/>

4. Салов В. О. Основи педагогіки вищої школи. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. 183 с.

5. Сичікова Я. О. Науково-методологічні засади оцінювання якості й властивостей наноструктур на поверхні напівпровідників: дис... доктора тех. наук: 05.01.02 / Бердянський державний педагогічний університет; Національний науковий центр «Інститут метрології» Міністерства економічного розвитку і торгівлі України. Харків, 2018. 442 с.

6. Хоменко В. Г. Теоретичні та методичні засади проектування дуального змісту професійної підготовки майбутніх інженерів-педагогів комп'ютерного профілю : монографія. Бердянськ : БДПУ, 2015. 473 с.

7. Suchikova Y., Bohdanov I., Kovachov S., Bardus I., Lazarenko A. and Shishkin G. *Training of the Future Nanoscale Engineers: Methods for Selecting Efficient Solutions in the Nanostructures Synthesis*. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (August 26–28, 2021). Lviv. P. 584-588.

References

1. Bardus, I. (2018). *Fundamentalizatsiya profesinyoyi pidhotovky maybutnikh fakhivtsiv u haluzi informatsiynykh tekhnolohiy do produktyynoyi diyal'nosti: monografiya* [Fundamentalization of professional training of future specialists in the field of information technologies to productive activity]. Kharkiv : PromArt [in Ukrainian].

2. *Dovidnyk kvalifikatsiynykh kharakterystyk profesiy pratsivnykiv. Vyp. 1. Profesiyyi pratsivnykiv, shcho ye zahal'nymy dlya vsikh vydiv ekonomichnoyi diyal'nosti. Rozdil 1. Profesiyyi*

kerivnykiv, profesionaliv, spetsialistiv ta tekhnichnykh sluzhbovtziv [Handbook of qualification characteristics of employees' professions. Vip. 1. Professions of workers that are common to all types of economic activity. Section 1. Professions of managers, professionals, specialists and technical staff]. Kharkiv : Factor [in Ukrainian].

3. *Profesiyi. Inzhener-nanotekhnoloh* [Professions. Nanotechnologist engineer]. URL: <https://osvita.ua/proforientation/profession/74269/> [in Ukrainian].

4. Salov, V. (2003). *Osnovy pedahohiky vyshchoyi shkoly* [Fundamentals of higher school pedagogy]. Dnepropetrovsk: Natsional'nyj hirnychyj universytet [in Ukrainian].

5. Sychikova, Y. (2018). *Naukovo-metodolohichni zasady otsynuvannya yakosti y vlastyivostey nanostruktur na poverkhni napivprovodnykiv: dys... doktora tekhn. nauk: 05.01.02* [Scientific and methodological principles of evaluating the quality and properties of nanostructures on the surface of semiconductors: Ph.D. Sciences: 05.01.02] / Berdyans'kyj derzhavnyj pedahohichnyj universytet ; Natsional'nyj naukovyj tsentr «Instytut metrolohiyi» Ministerstva ekonomichnoho rozvytku i torhivli Ukrainy. Kharkiv [in Ukrainian].

6. Khomenko, V. (2015) *Teoretychni ta metodychni zasady proektuvannya dual'noho zmistu profesynoyi pidhotovky maybutnikh inzheneriv-pedahohiv komp'yuternoho profilu : monohrafiya* [Theoretical and methodical principles of designing the dual content of professional training of future engineers-teachers of computer profile: monograph]. Berdyansk: BDPU [in Ukrainian].

7. Sychikova, Y., Bohdanov, I., Kovachov, S., Bardus, I., Lazarenko, A. and Shishkin, G. (2021). *Training of the Future Nanoscale Engineers: Methods for Selecting Efficient Solutions in the Nanostructures Synthesis*. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (August 26–28, 2021). Lviv, 584–588.

АНОТАЦІЯ

Стаття присвячена актуальній проблемі підвищення якості професійної підготовки майбутніх фахівців у галузі наноматеріалознавства до продуктивної діяльності, а саме аналізу його професійної діяльності зі створення наноструктур на поверхні напівпровідників. У статті проаналізовано предмети, продукти, засоби, процеси та умови професійної діяльності фахівця з синтезу наноструктур на поверхні напівпровідників і визначено властивості вихідного та синтезованого наноматеріалу, умови, технології, засоби їх створення. Описано чинники, які впливають на характеристики наноструктур під час їх синтезу (ресурсні, технологічні), властивості вихідних та синтезованих наноматеріалів (фізичні, хімічні, біологічні, морфологічні, екологічні, механічні, технологічні, патентно-правові, економічні та функціональні). Наведено найпопулярніші методи (хімічного, електрохімічного травлення, літографії) та засоби синтезу наноструктур на поверхні напівпровідникової пластини.

На основі узагальненої структури виробничого процесу визначено зміст професійної діяльності nanoінженера з організації процесу виробництва наноматеріалів (виявлення кореляцій між умовами та результатом синтезу, вибір оптимальних технологічних рішень, складання методики експерименту, підготовка устаткування, зразків та засобів контролю, нагляд за плином процесів і режимів, контроль за хімічними реакціями, умовами синтезу); із реалізації технологічного процесу (проєктування майбутнього наноматеріалу, його виготовлення та вдосконалення); з управління виробничим процесом (урахування впливу чинників на характеристики, планування ресурсів, оцінка правильності вибору матеріалів, режимів, методів, а також регулювання процесу синтезу шляхом проведення аналогічних досліджень на інших зразках, аналіз впливу неврахованих раніше чинників, коректування умов синтезу, ресурсів, усунення небажаних явищ).

Ключові слова: нанотехнології, професійна діяльність, виробничий процес, системний підхід, nanoінженер.