

# НАНОТЕХНОЛОГІЇ В ЕЛЕКТРОНІЦІ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

МАТЮШЕНКО І. Ю.

кандидат технічних наук

Харків

На щорічному зібранні Американської фізичної спілки 29 грудня 1959 р. Річард Фейнман у своїй лекції «Ще багато місця у самому низу» сформулював основні нанотехнологічні принципи [1, с. 68]:

- ✦ мініатюризація пристроїв, аж до граничних розмірів атомно-молекулярного рівня, яка принципово покращує їх функціональні можливості;
- ✦ управління макровластивостями об'єкта за рахунок спрямованої заданої зміни його структури на нано- (молекулярному) рівні.

Протягом останніх сорока років розробка конкретних наносистем підтвердила значущість і привабливість цієї діяльності, що було передбачено наприкінці попереднього століття. Так, у 2002 р. співробітник Аргонської національної лабораторії США Коелінг уточнив зміст таких понять, як нанонаука і нанотехнології, цілями яких є:

- ✦ розуміння і передбачення властивостей матеріалів в галузі нанорозмірів;
- ✦ виробництво компонентів нанопристроїв, використовуючи технологічний підхід «знизу – догори»;
- ✦ інтегрування наноконструкцій у пристрої макроскопічних розмірів для практичного використання.

Структуру нанотехнологічних досліджень представлено на рис. 1 [2, с. 34].

Сьогодні у розпал нанотехнологічного буму, що охопив більшість сфер діяльності людини, саме обчислювальна техніка стала «випробувальним полігоном» для нанотехнології, проходячи послідовні стадії мініатюризації елементів пристроїв, що створюються.

Наносистеми представляють собою у загальному вигляді розподілені середовища зі складними механізмами взаємодії на нанорівні. Саме ці механізми визначають процеси самозбирання або самоорганізації на рівні структури системи, які призводять до появи нових, виникаючих на макрорівні властивостей системи. У силу схожості принципів побудови і функціонування розподілених систем на різних рівнях структурної організації, а також виникаючих у них процесів і нових властивостей, виявляється і ряд аналогій між системами, побудованими на рівні нанорозмірів, і макроскопічними розподіленими системами.

Практичні результати нанотехнології дуже яскраво проявляються в галузі електроніки та інформаційних технологій, які використовуються [3, с. 56]:

- ✦ як сировина для виробництва різних пристроїв і компонентів (53%);
- ✦ як матеріали для обробки напівпровідникових пластин (34%);
- ✦ для створення інструментів і обладнання при виробництві електронних пристроїв і компонентів (7%);
- ✦ інше (6%).

У табл.1 представлено основні показники, що характеризують світовий ринок електронної промисловості [4, с. 209 – 211].



Рис. 1. Структура нанотехнологічних досліджень

Таблиця 1

## Показники, що характеризують світовий ринок електроніки

№ п/п	Галузь	Обсяг ринку, трлн дол. США
1	Галузі промисловості, пов'язані з електронікою	15,0
2	Електронне устаткування	Більше 1,0
3	Напівпровідникові компоненти	0,205
4	Напівпровідникове виробниче устаткування	0,03
5	Матеріали для виробництва напівпровідників	0,02

При цьому середньорічні темпи зростання ринку електронної промисловості й пов'язаних з нею інших галузей становлять більше 7% у рік.

Існує кілька виправданих комерційних причин, що змушують усе більше зменшувати геометричні розміри устроїв, що представлено в табл. 2 [5, с. 12 – 14].

но 2 дол. США, то в 2008 р.– уже менше нанодолара! У табл. 3 наведено Міжнародний мережевий графік технології напівпровідників (ITRS), довідкового документа, розробленого спільними зусиллями вчених різних країн, де представлено п'ятнадцятирічні перспективи розвитку напівпровідникової промисловості [5, с. 12].

**Нанотехнології в електроніці** – це й нові, ще більш швидкісні й надійніші методи обробки, передачі і зберігання інформації як на основі квантових ефектів (спінтроніка, фотоніка, плазмоніка, квантові обчислення), так і на основі нових технологій (самозбирання в його різноманітних реалізаціях, молекулоніка (молекулярна електроніка), активні й пасивні елементи (транзистори, катоди, між'єднання) наноелектроніки, пристрої для зберігання інформації, а також на основі нанопродуктів (оптоелектроніка, органічна оптоелектроніка, між'єднання тощо).

Найбільш реально очікуване й найефективніше практичне застосування нанотехнології повинні одержати в галузі *нанозапису й зберігання інформації*, оскільки комп'ютерна пам'ять заснована на тому, що біт (одиниця

Таблиця 2

## Комерційні причини, що змушують зменшувати розміри устроїв

№ п/п	Спосіб	Вигода для виробника
1	Зменшення розмірів транзисторів	Задана кількість транзисторів може розміститися на меншій площі, що дає можливість скоротити фізичні розміри чипа. Як наслідок, з однієї підкладки може бути зроблено більшу кількість чипів за умови одночасного формування всіх чипів на підкладці. Це веде до збільшення прибутку компаній, що випускають напівпровідникові устрої
2	Розміщення на одному чипі такого ж самого розміру більшої кількості транзисторів	При цьому на кристалі такого ж розміру, як і раніше, виробник може розмістити більшу кількість вузлів різної функціональності, що дозволяє виготовляти більш складні інформаційні системи (ІС) і продавати їх за більш високою ціною
3	Використання підкладок більшої площі	Чим більше діаметр підкладки (2002 р.– 6 дюймів, 2006 р.– 8 дюймів, 2009 р.– 12 дюймів, 2012 р.– 18 дюймів), тим дорожче їхня обробка, що пов'язане з необхідністю розробки або модифікації устаткування й більшою якістю хімікатів для обробки. Однак такий перехід на підкладки більшого діаметра дає можливість виробникам підвищувати свій дохід, дозволяючи значно збільшувати випуск напівпровідникових устроїв

Ці фактори змушують виробників напівпровідникових устроїв інвестувати значні кошти в розробку нових технологій і вдосконалювання виробничого устаткування, що дає можливість переходити від одного покоління ІС до іншого кожні 2 – 3 роки. І, як наслідок цього, за останні сорок років відбулося різке зниження собівартості кожного окремого транзистора в складі монолітного чипа: якщо в 1968 р. він коштував приблиз-

інформації) задається станом середовища (магнітного, електричного, оптичного), у якій записується інформація. На поверхні можна реалізувати ситуацію, при якій 1 біт буде записаний у вигляді скупчення, наприклад, 100 або 10 атомів. Внаслідок дії різних факторів (геометричних і фізичних) разом зі зменшенням розмірів (підвищенням компактності) устроїв значно зменшується й тривалість протікання різноманітних процесів у кон-

Таблиця 3

## Міжнародний мережевий графік технології напівпровідників (ITRS)

Показник	Рік виробництва					
	2001	2004	2007	2010	2013	2016
Розмір технологічного вузла, нм	130	90	65	45	32	22
Енергія на одне перемикання, фемтоДж	н. д.	0,137	0,076	0,015	0,007	0,002

кредитній системі, тобто зростає її потенційна швидкодія (у сучасних комп'ютерах швидкодія становить близько 1 нс, а при застосуванні ряду наноструктур відкривається потенційна можливість скорочення часу на кілька порядків!). При подальшому скороченні розмірів у поведженні електронів починають переважати властивості хвилі, а не частки. Вступають у дію закони квантової динаміки, на зміну бітам приходять квантові біти [1, с. 101 – 107].

*Еволюційна наноелектроніка* дозволить і в подальшому звільнити розумову та фізичну працю від рутинної праці і обіцяє нові можливості для індустрії відпочинку. А революційна наноелектроніка, що заснована як на збиранні структур «знизу вверх», так і на нових, таких які ще не використовуються, принципах обробки інформації (квантові комп'ютери, фотоніка тощо), введе комп'ютеризацію світу на якісну нову ступінь, яку можна порівняти зі зміною арифмометрів на обчислювальні машини [3, с. 56].

У рамках масштабного аналітичного дослідження «Маркетинговий аналіз ринку нанопродуктів», проведеного російськими фахівцями на замовлення Федеральної агенції з науки та інновацій в рамках Федеральної цільової програми «Розвиток інфраструктури

наноіндустрії в Російській Федерації на 2008 – 2010 рр.» [3], було розроблено класифікацію секторів ринку нанопродуктів, а також виконано аналіз обсягів продажів первинних нанопродуктів на світовому ринку у 2009 р., який склав 22,7 млрд дол. При цьому криза скоротила продажі на 16% відносно до передкризових обсягів у 27,9 млрд дол. Основний обсяг ринку сформувавши продажу наноматеріалів (10,1 млрд дол.), серед секторів – «Обробна промисловість» (4,0 млрд дол.), «Енергетика» (3,9 млрд дол.), «Медицина і біотехнологія» (2,6 млрд дол.), а також «Спеціальне обладнання і приладна база» (2,6 млрд дол.). З урахуванням динаміки, що створюється, рейтинг секторів за обсягами продажів та в найближчій перспективі у 2009 – 2014 рр. збережеться (табл. 4 [3, с. 61], при цьому найбільше зростання очікується в *електронній промисловості*, що, можливо, перемістить цей сектор з останньої рейтингової позиції.

З урахуванням представлених пріоритетів усі застосування нанотехнологій до сектора «Електроніка і інформаційні технології» можна згрупувати в чотири сегменти, які представлені в табл. 5 [3, с. 57].

У табл. 6 представлено структуру і динаміку сектора «Електроніка і ІКТ» у розрізі ринкових сегментів у 2009 р. і у 2014 р. (за прогнозними оцінками) [1, с. 156].

Таблиця 4

Рейтинг секторів світового ринку нанопродуктів за обсягами продажів у 2014 р. (млн. дол.) і за темпами росту у 2009 – 2014 рр. (%)

№ з/п	Сектор ринку нанопродуктів	Обсяг продажів у 2014 р., млн дол. США	Середньорічне зростання у 2009 – 2014 рр., %
1	Наноматеріали	16 702,9	10,6 (3)
2	Обробна промисловість та інші застосування	6 396,4	10,1 (4)
3	Енергетика	6 028,6	9,2 (5)
4	Медицина і біотехнології	4 642,3	12,1 (2)
5	Електроніка і ІКТ	1 750,8	26,2 (1)
Усього		35 521,0	

Таблиця 5

Основні сегменти ринку нанотехнологій у сфері «Електроніка і інформаційні технології» відповідно до галузі застосування

Магнітні матеріали	Оптоелектроніка	Електроніка	Нанотехнологічні інструменти для електроніки
Магніторідинне ущільнення; – магнітні запам'ятовуючі пристрої; – магнітні нанокомпозити	Виробництво оптичних волокон; – нанолюмінофори для світлодіодів та вдосконалених дисплеїв; – квантові оптичні пристрої; – плазмоніка	Хіміко-механічна планаризація (ХМП); – багатощарові керамічні конденсатори; – атомно-пошарове осадження; квантові обчислення	Наноманіпулятори; ближчепольові оптичні мікроскопи; – інструменти для обробки наночастинок; – вдосконалені інструменти для нанолітографії

Таблиця 6

Структура і динаміка сектора «Електроніка і ІКТ» у розрізі ринкових сегментів у 2009 р. і 2014 р.

№ з/п	Сегмент	Обсяг у 2009 р., млн дол.	Обсяг у 2014 р., млн дол.	Середньорічне зростання у 2008 – 2014 рр., %
Усього, у тому числі		528,5	1750,8	26,2
1	Електроніка	445,8	1537,4	18,0
2	Магнітні матеріали	61,0	31,0	– 14,6
3	Оптоелектроніка	21,6	182,4	53,3

З табл. 4 та табл. 6 видно, що у прогнозованому періоді з 2009 до 2014 рр. сектор «Електроніка та ІКТ» – це найбільший індустріальний сегмент ринку нанопродуктів [1, с. 157]. З 2009 до 2014 рр. застосування нанопродукції у цьому секторі (без урахування наноелектроніки) у вартісному відношенні збільшиться практично в 4 рази (з 2,2 млрд дол. до 8,1 млрд дол.). Найбільші темпи зростання нанозастосувань покаже сегмент «Оптоелектроніка» (53,3%). До 2014 р. частка сегмента «Оптоелектроніка» збільшиться, але тим не менш основну частку ринку будуть займати нанотехнологічні інструменти для електроніки; середні темпи росту сектора в цілому у складних відсотках складає 26,2%, а без урахування сегменту «Нанотехнологічні інструменти для електроніки» – 17,5%.

Цілком зрозуміло, що наноматеріали створюються і реалізуються виробникам кінцевої продукції в усіх індустріальних секторах економіки. У табл. 7 наведені приклади використання в електроніці та ІКТ наноматеріалів, що вже сьогодні знаходяться у комерційному виробництві і представлені на ринку, у чотирьох основних індустріальних секторах [3, с. 68 – 71], а також (у табл. 8) представлено прогноз виходу на стадію комерційного застосування в електроніці наноматеріалів, що знаходяться у стадії розробки в період 2009 – 2015 рр. [3, с. 73 – 81].

У табл. 9 також представлено сьогоднішнє й майбутнє у застосуванні наночастинок в електроніці [6, с. 54 – 56].

Таблиця 7

Приклади застосування в електроніці та ІКТ наноматеріалів, представлених на світовому ринку

Сектор	Типи наноматеріалів				
	Нанорозмірні плівки і покриття нанорівня	Тверді наночастинки	Наноструктурні монолітні матеріали	Полі наночастинки	Нанокompозити
Електроніка та інформаційно-комунікаційні технології	<p>OLED – органічні світлодіоди для плоских панельних дисплеїв;</p> <p>– тонкі плівки наноалюмінію для оптичного запису інформації;</p> <p>– тонкі плівки зі сплавів Cr і Co для жорстких дисків і голівок при запису й зберіганні інформації («вічні носії»);</p> <p>– тонкі плівки оксиду заліза і алюмінію для магнітного запису інформації високої щільності; діоксид кремнію для оболонки оптоволоконних кабелів;</p> <p>– тонкі плівки полімеру для діелектричних покриттів LOW-K;</p> <p>– метали і оксиди, що проводять, для покриттів в екранах променевих трубок та їх корпусів в електроніці</p>	<p>Кольорові барвники, чорнила й пігменти (фарби для струминних принтерів, що не забруднюють друкувальну голівку);</p> <p>– діоксид кремнію, оксид алюмінію і суміші на основі діоксиду кремнію для полірування жорстких дисків в ІТ;</p> <p>– оксид заліза для суспензій і феромагнітних рідин для акустичних систем і жорстких дисків в електроніці</p>	–	<p>Вуглецеві нанотрубки для наконечників зондів мікроскопів, що сканують (зондова мікроскопія)</p>	–

Таблиця 8

Прогноз виходу на стадію комерційного застосування в електроніці т ІКТ наноматеріалів, що знаходяться у стадії розробки

№ з/п	Тип наноматеріалу	Найменування наноматеріалу	Рік						
			2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Тверді наночастинки	Рідкоземельні нанолюмінофори (FED / SED) для плоскопанельних дисплеїв	➤			•		✓	
		Наночастинки металів, для компактних оптичних схем плазмоніки		➤		•		✓	
2	Полінаночастинки	Вуглецеві нанотрубки, наноконуси для пристроїв на основі польової емісії (рентгенівські апарати, плоскопанельні дисплеї)	•	✓					
		Вуглецеві нанотрубки для пристроїв універсальної комп'ютерної пам'яті	➤	•	✓				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Вуглецеві нанотрубки для напівпровідників і чипів, що збільшують тактову частоту	+	➤			•	✓	
		Вуглецеві нанотрубки для напівпровідників	+	➤			•	✓	
3	Нанокompозити	Матриця органічного полімеру / діоксид кремнію або титану для підсумовуюче-розгалужуючих фільтрів	➤	•	✓				
		Квантові точки (сульфід свинцю, селеніт свинцю) для оптичних перемикачів	+	➤			•	✓	
		Діоксид кремнію, що легований ербієм / кремній для оптоволоконних підсилювачів	➤	•	✓				
		Ніобат літію, танталат літію для оптичних модуляторів при передачі сигналів по оптоволоконним кабелям	+	➤			•	✓	

**Позначки:**

- + фундаментальні дослідження і розробки;
- прикладні дослідження і розробка технології;
- дослідні зразки та їх застосування;
- ✓ початок комерційного виробництва і вихід продукції на ринок.

Таблиця 9

**Сьогодення й майбутнє у застосуванні наночастинок в електроніці**

Галузь застосування	У розробці	На ринку	Добре вивчено
Електроніка	Магнітні наночастки для створення запам'ятовуючих пристроїв високої щільності зберігання інформації; – захист від електромагнітних перешкод з використанням провідних і магнітних матеріалів; електронні схеми на основі Cu, Al; – технології відображення з використанням устроїв автоелектронної емісії на основі провідних оксидів	Феррорідини на основі магнітних матеріалів; оптико-електронні устрої: – комутатори на основі кераміки, легованої рідкоземельними елементами; – провідні покриття й тканини на основі кераміки, легованої рідкоземельними елементами	Керуючі мікропроцесори на основі алюмінію й двоокису церію; – покриття й супутні матеріали для волокон на основі Si

Наведемо також декілька прикладів використання нанотехнологій в електроніці (у період 2001 – 2010 рр.) [7, с. 179 – 199]:

1) Компанія IBM створила *наноінвертор*, який при розміщенні нанотрубки між двома електродами підсилює електричний сигнал і здатен «перекидати» вихідну напругу на вхід. Подальший розвиток цієї ідеї може привести до виключно малих за розмірами обчислювальних і комунікаційних пристроїв, що споживають надзвичайно малу кількість енергії.

2) Групі вчених з лабораторії Белла компанії Lucent Technologies вдалося створити *електричний ланцюг з транзисторів*, які були одержані в результаті *хімічного самозбирання* органічних молекул.

3) Повідомляється також, що для вимірювання переміщень на рівні тисячних часток нанометру було розроблено *одноелектронний транзистор* – переми-

каючий пристрій, здатний сполучати або роз'єднувати електричні ланцюги за рахунок управління рухом тільки одного електрона. В існуючих транзисторах таке перемикування відповідає управлінню сумісним рухом сотень тисяч електронів, тому перехід до одноелектронних перемикачів приведе до різкого зниження енергоспоживання і, відповідно, тепловиділення.

4) Головною метою розробників комп'ютерної техніки є збільшення кількості перемикачів на чипі. Створення мініатюрних і надзвичайно складних систем підвладне багатьом дефектам розташування окремих атомів і цілих груп атомів, які спроможні порушити функціонування електричного ланцюга. Для підвищення надійності електричних наносистем розробляються зовсім нові архітектури. Наприклад, створення *reshіток з перехресними рядами нанопроводів* (товщиною всього 100 атомів!) дозволяє утворити мережу молекулярних

перемикачів (наприклад, комбінацій молекул з архітектурою *ротаксан*, яка дозволяє створювати дуже стійкі до збоїв процесори) у місцях перехрещення нанопроводів. При достатньо сильному напруженні місце перехрещення переходить із непровідного стану в провідний. За оцінками фахівців, на одному квадратному сантиметрі чипу можна розмістити  $10^{12}$  таких елементів, а швидкість переключення таких пристроїв повинна бути в 100 разів вищою за найсучасніші покоління чипів Intel.

5) На основі трьох вуглецевих нанотрубок вчені з Великобританії і Південної Кореї створили *наноперемикач* з регульованою чутливістю. При поданні електричного потенціалу на крайню нанотрубку середня нанотрубка відхиляється у бік крайньої зі створенням контакту.

6) Групі вчених із США за допомогою унікальної кристалічної структури вуглецевої нанотрубки вдалося *передати тепло дискретними порціями* (тепло переноситься фононами *без розсіювання* (!) на відстань біля мікрону), що відкриває широкі перспективи для охолодження наоелектроніки.

7) Вуглецеві нанотрубки мають багато переваг, зокрема більш швидкий рух носіїв заряду, ніж у кремнії; вони можуть мати розмір у 5 разів менше, ніж мінімальний розмір кремнієвих елементів електросхем. Але створення електричних ланцюгів на їх основі дуже утруднено внаслідок розподілу одержаних нанотрубок в хаотичному порядку. Вчені з Університету Південної Каліфорнії підібрали *підкладку для нанотрубок*, на якій вони *могли самостійно упорядкуватись* (до 40 нанотрубок на мікрон). Ця технологія дозволяє створювати гнучку електроніку, чутливі сенсори тощо.

8) Французькі та англійські вчені створили *нанокатод* на основі впорядкованого масиву вуглецевих нанотрубок, який спроможний працювати при частотах 32 ГГц. Такі катоди спроможні працювати в «холодному» режимі (без нагріву); миттєво включаються; функціонувати при значно більших частотах і щільності струму, ніж існуючі термоелектронні катоди, мають значно меншу вагу. Вони можуть ідеально замінити існуючі катоди у мікрохвильових телекомунікаційних пристроях на космічних супутниках.

9) Компанія mPhase (США) разом з підрозділом Bell Labs компанії Lucent-Alcatel запропонувала абсолютно новий спосіб створення *резервних батарей* (які більшу частину часу неактивні і використовуються в аварійних ситуаціях з гарантованим повним зарядом) *на основі так званої «нанотрави»* (тобто регулярним розташуванням нановолокон на площині) з використанням ефекту контрольованого змочування нановолокон при підвищенні напруги. Можуть економічно застосовуватись в операційних залах, для короткочасної передачі сигналів від активізованих сенсорів, для систем тривожного оповіщення.

10) Учені з Сибірського відділення РАН (Росія) навчилися *регулювати ступінь закручення двошарових наноплівочок* (один шар з кремнію, другий – суміш германію з кремнієм) за рахунок стоншення шарів з утворенням химерних форм (багатовиткові трубки, спіралі, клешні, візерунки тощо), які скоро будуть мати надзвичайне зна-

чення для створення наносенсорів, наноконденсаторів, нанокотушок тощо. Цей спосіб одержав назву «мікроорігами», тобто самозбирання трьохмірних мікроскопічних структур на основі механічної напруги, що викликана незбігом кристалічних решіток зчеплених разом надтонких плівок. Створені на цьому принципі химерні структури утворюють основу для багатьох безпрецедентних мікроелектронних пристроїв, включаючи мікродзеркала в бездротових телекомунікаційних з'єднаннях.

11) Учені прагнуть використати високу міцність і пружність вуглецевих нанотрубок. Нещодавно винайдено оригінальний спосіб використання відносного ковзання з низьким тертям для різних шарів багатшарових нанотрубок, як у телескопічній антені телевізора. Було створено *телескопічний наноперемикач*, що контролюється електричною напругою.

12) Для створення *оптичної інтегрованої обчислювальної комунікаційної і сенсорної нанотехніки* необхідно навчитись маніпулювати оптичними сигналами в структурах з розмірами значно менше довжини хвилі світла. Учені навчились створювати наносвітловоди, тобто напівпровідящі нановолокна циліндричної форми, які можуть вловлювати і передавати ультрафіолетове і видиме світло. На базі цих наносвітловодів вдалося також створити перші прототипи наномасштабних оптичних елементів. Завдання майбутніх досліджень – створити нановолоконну оптичну обчислювальну схему.

13) У 2006 р. група вчених з Університету Нотр-Дам (США) і Мюнхенського технологічного університету (Німеччина) запропонувала альтернативний шлях розвитку електроніки без транзисторів (!). На основі квантових точок було створено прототип *магнітного кліткового автомату* з масиву магнітних наноструктур, який спроможний переключатись і виконувати обчислення в залежності від стану спинів сусідніх наноструктурних елементів. Таким чином, крім відомих важливих переваг *спінтроники* (зберігання даних при відключенні живлення, відсутність витоку струму, принципово висока щільність елементів), було продемонстровано й нові: можливість на протязі кількох наносекунд адаптувати архітектуру процесору для оптимального виконання конкретної задачі, відсутність витрат енергії і нагріву процесору. З'явилась можливість створити фундаментальні основи *повністю магнітних обчислювальних пристроїв*, в яких наномасштабними і магнітними будуть не тільки носії пам'яті, але й обчислювальні елементи.

14) У 2000 р. декільком групам вчених вдалося створити повністю *полімерну інтегральну мікросхему*. Одна група вчених поєднала 300 транзисторів, а інша – побудувала складний масив з 864 органічних транзисторів та інших компонентів на гнучкому пластику. Ці досягнення дозволяють з урахуванням ускладнення структури інтегральних схем розглядати пластик як один із носіїв електронних чипів (наприклад, для гнучких кредитних карток, штрихкодів і навіть комп'ютерних клавіатур і дисплеїв).

Хоча полімери мають меншу провідність, ніж метали, але вони володіють надзвичайно високою гнучкістю і дешевизною виготовлення. Відкриття полімерів (органічних речовин), що проводять електричний

струм, має велике значення для промисловості – для гнучких, викривлених і прозорих поверхонь, де неможливо застосовувати кремнієві елементи. Крім того, полімери мають не тільки електропровідність, але й більш багатобіччі властивості: електролюмінесценцію, яка достатня для створення транзисторів, діодів і фотодетекторів. *Пластикові транзистори*, у порівнянні з традиційними, мали досить низьку швидкодію. Але вже у 2005 р. група вчених з Великобританії повідомила про успішне вирішення проблеми: вони створили пластиковий транзистор, у якому електричні заряди двигаются у 6 разів швидше за попередні, що дорівнює швидкодії кремнієвого транзистора. Таким чином, стало можливим реалізувати давню мрію інженерів про використання рідких чорнил і спеціалізованого струминного принтера для швидкого і дешевого друку, як на звичайному принтері, будь-яких мікросхем з використанням органічних напівпровідників, що мають високу довговічність як у повітрі, так і у воді.

Поєднуючи прогнози, складені фахівцями з промислового розвитку й тенденції зміни ринку, були одержані оцінки на майбутнє по різних видах товарів, послуг і стану ринку.

За прогнозом американської наукової інноваційної мережі Nanotechnology News Network, до 2040 р. очікується такі тенденції розвитку комп'ютерної техніки й електроніки *на основі нанотехнологій (табл. 10)* [8].

Крім того, у результаті виконаних прогнозів фахівців Інституту стратегічних досліджень (Росія), консалтингової компанії Lux Research (США), Асоціації незалежних дослідницьких інститутів (Association of Independent Research Institutes, Великобританія), Центра нанотехнологій (Nanotec IT, Італія) та ін., а також на підставі матеріалів дорожніх карт розвитку нанотехнологій (Roadmaps at 2015 on nanotechnology application in the sectors of materials, health & medical systems, energy, 2006) виділяють *три основні етапи розвитку і з'явлення поколінь нанорозробок (табл. 11)* [4, с. 361 – 363].

У *табл. 12* представлено загальний прогноз розвитку нанотехнологій у коротко-, середньо- і довгостроковій перспективі, зроблений засновником великих венчурних фірм, великим і авторитетним експертом у нових технологіях, інноваційній політиці й організації нових виробництв у США Стівом Джарветсоном [9, с. 84 – 85]. ■

Таблиця 10

Прогноз розвитку комп'ютерної техніки і електроніки на основі нанотехнологій до 2040 р.

Наступне десятиліття (2010 – 2020 рр.)	Недалеке майбутнє (2030 – 2040 рр.)
ДНК-комп'ютери; – мініатюризація електронних компонентів; – бездротові комунікації; – глобальні мережі; – перетворювачі енергії; – засоби візуалізації; – побутові мікрокомп'ютери, що вбудовуються; – наносенсори; – НЕМС-електроніка	Нанороботи, що самореплікуються; – адаптивна електроніка; – штучний інтелект; – надшвидкодійні системи; – механокомп'ютери, засоби об'ємного зберігання даних

Таблиця 11

Основні етапи розвитку й появи поколінь нанорозробок

№ з/п	Етап	Назва	Характеристика
1	2	3	4
1	Перший етап, 2000 – 2005 рр.	«Пасивні наноструктури» (інкрементні нанотехнології)	1. Виробництво й застосування нанодисперсних порошоків, які з метою модифікації властивостей базових матеріалів вводили в різні конструкційні матеріали: метали й сплави, полімери й кераміку, а також додавали в ліки, косметику, їжу й інші вироби. 2. Це досить примітивне покоління наноматеріалів уже широко освоєно виробництвом і застосовується в багатьох товарах народного споживання. 3. Лише деякі нанорозробки знайшли своє застосування у високотехнологічних галузях промисловості
2	Другий етап, 2005 – 2015 рр. <i>Два періоди:</i> (2005 – 2015); (2010 – 2015)	«Еволюційні нанотехнології» <i>Два періоди:</i> «активні наноструктури»; «системи наносистем»	1. Прорив в галузі нанотехнологічної інноваційної діяльності. 2. Створення компонентів наноелектроніки, фотоніки, нанобіотехнологій, медичних товарів і обладнання, нейроелектронних інтерфейсів і наноелектромеханічних систем (НЕМС). 3. Значне зниження ролі первинних наноматеріалів (пасивних наноструктур). 4. Розширене застосування нанобіотехнологій у фармацевтичній промисловості (до 23%) і косметичній галузі. 5. Нанотехнології будуть використовуватися у всій (100%) комп'ютерній і радіоелектронній техніці, у 85% побутової та автомобільної техніки.

1	2	3	4
			6. Початок переходу до керованого самоскладання наносистем, створення тривимірних мереж, нанороботів і т. ін. Створення прототипів (у лабораторних умовах)
3	Третій етап, після 2020 р.	«Молекулярні наносистеми» (радикальні нанотехнології)	1. Молекулярні пристрої, атомний дизайн і т. ін. 2. До 2040 р. буде вдосконалено «універсальний реплікатор», заснований на нанотехнологіях, який дозволяє створювати об'єкт будь-якої складності за наявності сировини й інформаційної матриці. 3. Повна трансформація промисловості й сільського господарства, поява кіборгів, розвиток мистецтв, розваг, освіти

Таблиця 12

## Прогноз розвитку ринку нанотехнологій по тимчасових періодах

№ п/п	Період прогнозування	Основні технології й продукти
1	Короткостроковий (швидке отримання прибутку)	1. Виготовлення інструментів і деяких нових матеріалів (по-рошки, композити) на основі нанотехнологій. Деякі компанії вже сьогодні організували такі виробництва й стають дохідними). 2. Виробництво одномірних хімічних і біологічних датчиків, портативних медичних і діагностичних устроїв. 3. Початок виробництва мікроелектромеханічних устроїв (МЭМС)
2	Середньостроковий	1. Початок виробництва двомірних наноелектронних пристроїв (запам'ятовувальні пристрої, дисплеї, сонячні батареї). 2. Поява ієрархічно структурованих наноматеріалів і освоєння біомолекул у нанотехнологічних процесах. 3. Ефективне використання нанопристроїв для акумулювання й перетворення енергії. 4. Розвиток методів пасивної доставки ліків в організмі й діагностики. Виробництво медичних нанопристроїв, що імплантуються
3	Довгостроковий	1. Розвиток тривимірної електроніки. 2. Розвиток наномедицини. Розробка штучних хромосом. 3. Використання квантових комп'ютерів для розрахунку характеристик молекул і інших наноб'єктів. 4. Початок масового виробництва нанотоварів

## ЛІТЕРАТУРА

**1. Кизим М. О.** Перспективи розвитку і комерціалізації нанотехнологій в економіках країн світу та України: монографія / М. О. Кизим, І. Ю. Матюшенко. – Х. : ВД «ІНЖЕК», 2011. – 392 с.

**2. Рамбиди Н. Г.** Нанотехнологии и молекулярные компьютеры / Н. Г. Рамбиди. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 256 с.

**3.** Рынок нано: от нанотехнологий – к нанопродуктам / Г. Л. Азоев и др.; под. ред. Г. Л. Азоева. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 319 с.

**4. Балабанов В. И.** Нанотехнологии: правда и вымысел / В. Балабанов, И. Балабанов. – М. : Эксмо, 2010. – 384 с.

**5. Рахман Ф.** От микроструктур к наноструктурам // Наноструктуры в электронике и фотонике / Под ред. Ф. Рахмана. – М. : Техносфера, 2010. – 344 с.

**6. Кейси П.** Технологии наночастиц и их применение // Наноструктурные материалы / Под ред. Р. Ханнинка, А. Хилл. – М. : Техносфера, 2009. – 488 с.

**7. Гордиенко Ю. Г.** Как сорвать джекпот науки в XXI веке / Ю. Г. Гордиенко. – М. : Эксмо, 2007. – 496 с.

**8. Головин Ю. И.** Нанотехнологическая революция стартовала! [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.abitura.com/modern\\_physics/nano/nano2.html](http://www.abitura.com/modern_physics/nano/nano2.html)

**9. Джарветсон С.** Коммерциализация нанотехнологии. Работает ли закон Мура в микро- и нанoeлектронике? // Фостер Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности. – М. : Техносфера, 2008. – 352 с.