

Р.А. Пеленський

## Міцність вуглецевих наноплівки

*Інститут енергетики та систем керування, Національний університет "Львівська політехніка"  
вул. С.Бандери, 12, м. Львів, Україна, e-mail: [pele@polynet.lviv.ua](mailto:pele@polynet.lviv.ua)*

Наночастинки, нанодрошки і наноплівки мають дуже високу міцність, яка може перевершувати міцність сталі у десятки разів. Причиною цього явища можна вважати зменшення міжатомних віддалей у наноструктурі. Завдяки надвисокій міцності нановироби стають винятково цінним матеріалом в технологіях відновлювання деталей і виробів.

**Ключові слова:** міцність, структура нанооб'єктів.

*Стаття постуила до редакції 12.05.2014; прийнята до друку 15.09.2014.*

При вирощуванні кристалів з газової фази отримуємо кристали різної товщини. Найбільшу міцність мають найтонші кристали.

Міцність графенової плівки 7000 ГПа, міцність сталі 200 ГПа. Якщо розглянути нанонитку, у поперечному перерізі якої розміщено п'ять атомів чотиривалентної речовини, між атомами встановлюються ковалентні зв'язки. В приповерхневих атомах існують розірвані атомні зв'язки. Поверхневі електрони долають роботу виходу  $A$  і розміщуються на електронному листку циліндричної форми. В поєднанні з індукованим позитивним листком, розміщеним концентрично, вони утворюють подвійний шар електричних зарядів. Енергія цього подвійного шару намагається зайняти мінімальний об'єм, тому з'являються доцентрові сили, які стискають структуру, зменшуючи міжатомні віддалі. Виникає зустрічна протидіюча електрична сила.

Робота виходу електрона з вуглецю має порядок 5 еВ, тобто напруга подвійного електричного шару зарядів, що оповиває кристал, буде дорівнювати 5 В. Сміність енергетичного циліндра подвійного шару електричних зарядів становить величину:

$$C_0 = \frac{d}{\epsilon_a 2\pi r l} \quad (1)$$

де  $d$  – віддаль на яку рознесені заряди диполя,  $r$  – радіус енергетичного циліндра,  $l$  – довжина циліндра,  $\epsilon_a$  – діелектрична проникність середовища.

Енергетичний циліндр подвійного шару зарядів стискається, щоб зайняти мінімальний об'єм простору. Внаслідок цього появляється доцентрова сила:

$$F = \frac{dW}{dr} \quad (2)$$

Радіус енергетичного циліндра має величину, що вимірюється в ангстремах, тому значення сили  $F$  надвеликі – здатні зменшувати міжатомні віддалі. При зменшенні міжатомних віддалей збільшується міцність кристала. Особливо цінними є графенові плівки.

Графенові плівки винайдені у 2004 р.

Сьогодні людство освоює тонкоплівкову моноатомну матерію і знаходить для неї безліч нових застосувань. Якості наноплівкових структур перевищують об'ємні суцільні вироби. Деякі з них мають на порядки вищу міцність, ніж сталь, це суперпровідні матеріали або наддосконалі діелектрики чи магнітні напівпровідники. З'явилися наноструктури на основі яких буде здійснена революція в геліоенергетиці, стане можливим забезпечення потреб в енергії за рахунок сонячного випромінювання. Величезний прорив здійснено в побудові накопичувачів інформації.

Відмінності між масивним суцільним об'ємним матеріалом і наноматеріалом, що містить розриви атомних зв'язків на поверхні структур, відбуваються під впливом поверхневих атомів. Локальні приповерхневі області набувають зовсім нових властивостей порівняно з областями суцільного об'ємного середовища.

До появи наноструктур дослідники в основному працювали у симетричному світі: з спінами 1/2 та -1/2, магнітні моменти електронів себе взаємно компенсували, в локальній області середовища не було розподіленого об'ємного заряду. Згідно принципу релаксації Максвелла внесені в середовище електрони виштовхуються на поверхню.

В тонкоплівковому середовищі існує некомпенсований магнітний момент, який рухається в збуреному спіновому середовищі. Причина

виникнення некомпенсованого магнітного моменту полягає в тому, що на поверхні спіни електронів згідно принципу Хунда [1] мають однаковий напрям (+1/2 та +1/2). У такому випадку енергія локальної поверхні області буде мінімальною.

Рух некомпенсованого магнітного моменту  $M$  [А/м] спричиняє появу магнітного заряду, з густиною  $\rho_m$  [Вб/м<sup>3</sup>]. Вектор  $\vec{I}$  зв'язаний з  $\rho_m$  формулою:

$$\operatorname{div} \mu_a \vec{M} = -\rho_m \quad (3)$$

де  $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність.

Для аналітичного опису процесів у симетричному світі використовувались електродинаміка суцільних середовищ та механіка суцільних середовищ. На їхній основі розвивались електротехніка, радіотехніка та теоретична механіка.

Для побудови математичних моделей струмоперенесення в енергетиці та електромеханіці використовувалась несиметрична система рівнянь електродинаміки:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{\delta}_e + \frac{d\vec{D}}{dt} \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{d\vec{B}}{dt} \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{div} \vec{D} &= \rho_e, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\vec{H}$  та  $\vec{E}$  – вектори напруженостей електричного і магнітного полів,  $\vec{B}$  та  $\vec{D}$  – вектори магнітної та електричної індукції,  $\vec{\delta}_e$  – вектор густини електричного струму,  $\rho_e$  – питома густина розподіленого об'ємного електричного заряду.

Наноматерія має несиметричні властивості. Несиметрія виникає за рахунок розривів електронних зв'язків, виникнення поверхневих магнітних рівнів та поверхневих електронних станів Тамма та Шоклі. Внаслідок цього наноструктури оповиті подвійними шарами електричних та магнітних зарядів. Властивості середовища принципово відмінні у цьому розривному середовищі і суцільному середовищі. Міцність графенової наноплівки перевершує міцність сталі у 35 разів. Відкрито ефект велетенського магнітного опору, незначна зміна магнітного поля приводить до значної зміни електричного опору системи. За це відкриття А.Ферт і П. Грюнберг удостоєні Нобелівської Премії [2].

Магнітний момент електрона має квантове походження. Власне обертання електрона в сукупності з його обертанням навколо ядра атома становлять спіни електрона. Збурення спінового поля приводить до зародження наноманетизму, який має суто квантомеханічну природу. Як квантове явище наноманетизм супроводжується існуванням квантових сходинок на характеристиках наноструктур. Вебер-ампертна та кулон-вольтна характеристики графенової плівки мають квантові сходинки, на графіку питомого опору графену також чітко проявляються квантові сходинки.

Дискретна природа енергетичних рівнів в

матеріалах приводить до квантових переходів електронів з вищих рівнів на нижчі. Таким чином квантові ефекти властиві контактні, приповерхневим і наноструктурним явищам. Впоратися з їх аналітичним описом можна вводячи в розгляд дифузійні поля [3]. Дифузійні сили примушують переходити електрони з вищих енергетичних рівнів одних середовищ (областей певного середовища) на нижчі рівні. При цьому виникає електричне поле між областями, яких покинули електрони та областями, в які вони ввійшли. Коли напруженості дифузійного і електричного полів зрівнюються [4] процеси обміну електронами між середовищами припиняються.

Для аналітичного опису процесів у несиметричних (несуцільних) наносередовищах необхідно використовувати симетричну систему рівнянь електродинаміки:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{\delta}_e + \frac{d\vec{D}}{dt} \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\vec{\delta}_M - \frac{d\vec{B}}{dt} \\ \operatorname{div} \vec{B} &= \rho_i \\ \operatorname{div} \vec{D} &= \rho_e, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\vec{\delta}_M$  – вектор густини магнітного струму. Магнітний струм – це рух некомпенсованого магнітного моменту в збуреному спіновому середовищі. Цей рух може мати хвильовий характер – спінові хвилі. Величина  $\rho_m$  – об'ємна густина розподіленого магнітного заряду.

За ці неповні 9 років, відколи відкритий графен, опубліковано у світі на теми вуглецевих наноструктур біля 6000 статей. У багатьох з них дослідники звертали увагу на магнітні кластери на поверхні графену. В останні роки відкрито графен – моноатомний шар вуглецю.

Гібрид графена – графен відкритий через 5 років після відкриття графену, новий наноматеріал. Зовнішній електричний одинарний шар його зарядів має позитивний знак, завдяки ядрам водню. З електронами водню, що вступили в ковалентний зв'язки з атомами вуглецю він утворює подвійний шар електричних зарядів, що оповиває графенову плівку.

Зв'язок між зарядженими частинками в структурах здійснюється за допомогою фотонів. Фотон – найрозповсюдженіша у Всесвіті частинка, на один нуклон припадає 20 мільярдів фотонів. В теорії Максвелла не закладено квантування енергії. Планк у 1900 році ввів поняття квантів енергії. Саму назву фотон – квант енергії запропонував Гілберт Льюїс [5]. Переносниками електромагнітних взаємодій в системі є фотони (віртуальні фотони). У другій половині дев'ятнадцятого століття розвивалися хвильові моделі перенесення енергії.

Від Сонця на Землю переноситься у вигляді сонячних променів в тисячу раз більше енергії, ніж виробляють всі електростанції світу. Більшість електростанцій виробляє електроенергію на основі

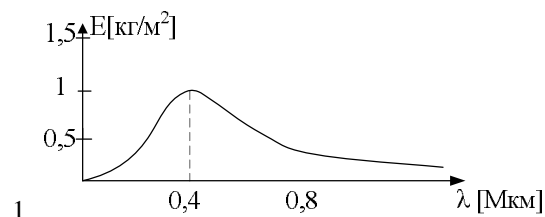


Рис. 1.

вугілля, нафти, газу, які є продуктами сонячного випромінювання попередніх мільйонів років. Тут сонячна енергія знаходилась на зберіганні в підземних сховищах у твердій, рідкій та газоподібній формі. Енергія на Землю приходить у вигляді суми квантів енергії – фотонів або враховуючи корпускулярно-хвильовий дуалізм – у вигляді електромагнітних хвиль. Зв'язок енергії випромінювання з довжиною хвиль якісно виглядає наступним чином (рис. 1).

Квант енергії сонячного випромінювання – фотон має нульову масу його заряд теж дорівнює нулю. Його спін дорівнює 1. Енергія фотона  $E$  і частота сонячного випромінювання  $\nu$  пов'язані співвідношенням:

$$E = h\nu, \quad (6)$$

де  $h$  – стала Планка.

Тиск випромінювання існує – це сила поділена на площу. Між фотонами і атомами здійснюється передача квантової інформації.

При поповненні інформацією або знятті її з подвійних шарів зарядів використовуються фотонні поля. Безпосередню участь беруть кванти енергії (фотони).

## Висновки

Надміцні вуглецеві наноструктури – це новий вид матерії, який володіє незаними до цих пір характеристиками. Особливу цінність представляють шаруваті наноструктури, наприклад, структури складені з високоякісного провідника графену та ідеального діелектрика графану, з моноатомних шарів заліза і феромагнітного матеріалу.

Висока міцність, прозорість для сонячних променів, суперпровідні властивості ставлять графен і графан в ряд найперспективніших матеріалів для геліоенергетики. Вони зручні при монтажі, мають високі експлуатаційні характеристики, не бояться дощу і граду.

Графенові наночастинки – винятковий матеріал в технологіях відновлювання деталей і виробів.

- [1] Enciklopedija. Fizika tverdogo tila, T. 1 (Naukova dumka, Kiiv, 1996).
- [2] S.A. Mikitin, Sorosovskij obozrevatel'nyj zhurnal 8(2), 92 (2004).
- [3] R.A. Pelenskij, Zhurn. tehn. fiziki: ZhTF 49(4), 889 (1979).
- [4] R. Pelensky, Materials of the XIII International Symposium of Theoretical Electrical Engineering ISTET 2005" (Lviv, Ukraine, 2005), p.71.
- [5] V.I. Klapchenko, Fotonna teorija materii (Kiiv, 2000).

R.A. Pelenskyi

## Strength of the Carbon Nanotube Films

*Lviv Polytechnic National University*

The strength of nanodevices is caused by the interatomic distance decrease in nanostructures. Graphene nanofilm has 35 times larger strength than the steel. Thin whisker crystals grown from the gas phase are ten times more durable than the thicker samples.

**Keywords:** strength, nanodevices.