

# МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

---

## SENSOR MATERIALS

---

---

УДК 539.31, 538.9

### ДАТЧИКИ ТИСКУ: ОБ'ЄМНІ НАПІВПРОВІДНИКИ, НИТКОПОДІБНІ КРИСТАЛИ, НАНОПРОВІДНИКИ

*Л. І. Панасюк<sup>1</sup>, В. М., Єрмаков<sup>1</sup>, В. В. Коломоєць<sup>1</sup>, А. В. Божко<sup>2</sup>, Л. В. Ящинський<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є.Лашкарьова НАН України,  
пр. Науки 41, 03028, Київ, Україна, e-mail: ekol@isp.kiev.ua

<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська 75, 43018, Луцьк, Україна

### ДАТЧИКИ ТИСКУ: ОБ'ЄМНІ НАПІВПРОВІДНИКИ, НИТКОПОДІБНІ КРИСТАЛИ, НАНОПРОВІДНИКИ

*Л. І. Панасюк, В. М., Єрмаков, В. В. Коломоєць, А. В. Божко, Л. В. Ящинський*

**Анотація.** Ми представляємо в даній роботі експериментальні результати щодо зміни симетрії в одновісно-деформованих вздовж головних кристалографічних напрямків вироджених кристалах p-Si. Показано, що в умовах зміни симетрії ефективні маси дірок також істотно змінюються особливо в області слабких одновісних деформацій, які відповідають за п'єзоэффект в напівпровідниках, об'ємних кристалах, ниткоподібних напівпровідниках та у нанопровідниках.

**Ключові слова:** тензочутливість, п'єзоопір, сенсор тиску, одновісна деформація, ниткоподібні кристали, нанопровідники

### PRESSURE SENSORS: BULK SEMICONDUCTORS, NEEDLE-LIKE CRYSTALS, NANOTUBES

*L. I. Panasyuk, V. N. Ermakov, V. V. Kolomoets, A. V. Bozhko, L. V. Yashchynskiy*

**Abstract.** Here we report the experimental results on the variation of the symmetry of bulk crystals that are uniaxial deformed along main crystallographic directions of degenerately doped p-Si. It is shown that variation of symmetry leads also to the essential changes of the holes effective mass, especially, at weak uniaxial deformations, responsible for the piezoresistance effect in bulk crystals whiskers and nanowire.

**Keywords:** tensosensitivity, piezoresistance, pressure sensor, uniaxial deformation, needle-like crystals, nanotubes

## ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ: ОБЪЕМНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ, НИТЕВИДНЫЕ КРИСТАЛЛЫ, НАНОПРОВОДНИКИ

*Л. И. Панасюк, В. Н. Ермаков, В. В. Колomoец, А. В. Божко, Л. В. Яцинский*

**Аннотация.** Мы представляем в данной работе экспериментальные результаты по изменению симметрии в одноосно деформированных вдоль главных кристаллографических направлений вырожденных кристаллах p-Si. Показано, что в условиях изменения симметрии эффективные массы дырок также существенно изменяются особенно в области слабых одноосных деформаций, которые отвечают за пьезоэффект в полупроводниках, объемных кристаллах, нитевидных полупроводниках и в нанопроводниках.

**Ключевые слова:** тензочувствительность, пьезосопротивление, сенсор давления, одноосная деформация, нитевидные кристаллы, нанопроводники

### ВСТУП

Матеріали, які використовуються для виробництва сенсорів тиску повинні відповідати наступним основним вимогам: висока тензочувствительність, технологічність, конструкційні можливості матеріалу, висока температурна стабільність, висока межа пружних деформацій, якщо враховувати великі перевантаження при умові виходу із штатного режиму. Матеріал, якому присутні в сукупності такі характеристики і можливості, є монокристалічний кремній, що витримує однооснові тиски при кімнатній температурі до 2 ГПа (20 000 кг/см<sup>2</sup>), хоча його теоретична міцність більш ніж на порядок перевищує це значення.

Більш високу міцність мають ниткоподібні (рис.1) кристали кремнію, вирощені з газової фази, якщо їх діаметр не перевищує величину (5 - 10) мкм [1]. Технологією отримання таких кристалів є метод хімічних транспортних реакцій. На рис 2 показаний пучок мікрокристалів Si, вирощених цим методом [1]. Цілий спектр сенсорів тиску, виготовлених на струнах з цього матеріалу, включаючи високоточні сенсори на резонаторах (точність таких резонансних датчиків досягає значення 0,1%), була розроблена у Львівському політехнічному інституті. Очевидно, такі сенсори тиску можуть використовуватися в якості калібрвальних сенсорів.

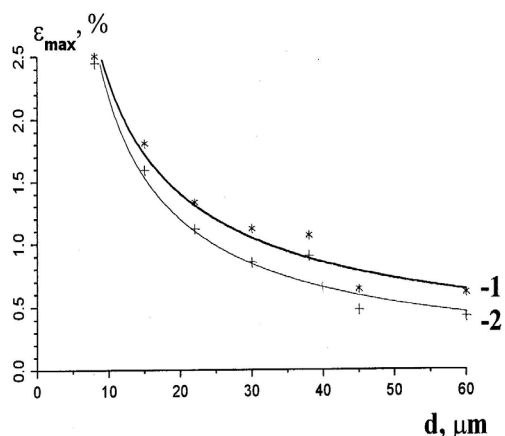


Рис.1. Залежність деформації руйнування мікрокристалів Si від їх діаметру при концентраціях домішки бору: 1 –  $2 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, 2 –  $5 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>

Ниткоподібні кристали є перехідними матеріалами до матеріалів, виготовлених з використанням нанотехнологій. Способи кріплення сенсорів, виготовлених з наноматеріалів, можуть збігатися із способами кріплення сенсорів на основі ниткоподібних кристалів.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проведення експериментів, пов'язаних із зміною симетрії кристалів кремнію при одновісній пружній деформації, необхідно мати пристрій для розтягування і стиснення кристалів. Якщо метод і установка для одновісного стиску кристалів давно відпрацьовані [2], то пристрій для розтягування кристалу мав свої

особливості. Перш за все за своїми розмірами він не повинен значно перевищувати розміри зразки, що використовуються при стисненні. Для реалізації експериментів в умовах чистого розтягування і чистого стиску ми використовували наступну конструкцію такого пристрою. Спочатку стиснута пружина встановлювалася на досліджуваному зразку, який закріплювався своїми кінцями за допомогою епоксидної смоли в пістонах, які були відцентровані. Після застигання епоксидної смоли досліджуваний кристал буде піддаватися розтягуванню за рахунок стиснутої пружини. Далі, прикладаючи одновісну деформацію стиску звичайним методом, ми поступово зменшуємо розтягнення кристалу. При значенні одновісного стиску, що визначається зусиллям стисненої пружини, ми поступово і плавно переходимо від деформації розтягування до деформації стиску.

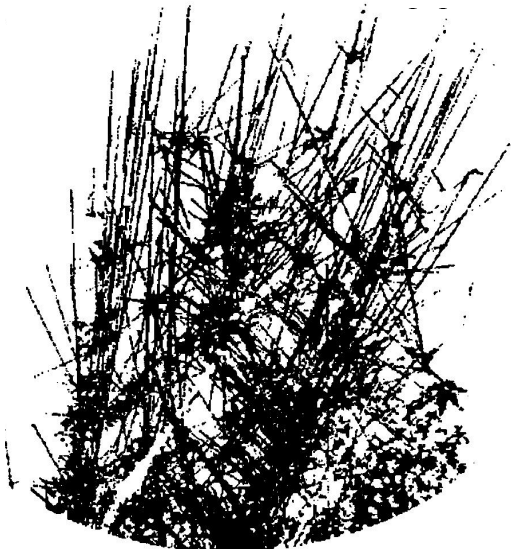


Рис. 2. Пучок мікрокристалів Si

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Відомо, що для об'ємних матеріалів тензочутливість визначається в загальному випадку виразом, в якому залежність провідності  $\sigma$  від одновісної деформації визначається (в межах слабких деформацій – п'єзоопір) залежністю енергій активації  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  та  $\varepsilon_3$  від деформації:

$$\sigma = \sigma_1 \exp(-\varepsilon_1/kT) + \sigma_2 \exp(-\varepsilon_2/kT) + \sigma_3 (\exp(-\varepsilon_3/kT)) \quad (1)$$

Практично такою ж залежністю від одновісної деформації буде визначатися співвідно-

шення і для величини тензочутливості в ниткоподібних кристалах.

Для датчиків одновісної деформації, якими можуть служити нанопровідники, залежність тензочутливості від одновісної деформації буде визначатися виразом [3]:

$$\sigma = \frac{p_{lh} e^2 \tau_{lh}}{m_{lh}} + \frac{p_{hh} e^2 \tau_{hh}}{m_{hh}} \approx \frac{\rho_i e^2 \tau}{m^*}, \quad (2)$$

де

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{p_{lh} + p_{hh}} + \left( \frac{p_{lh}}{m_{lh}} + \frac{p_{hh}}{m_{hh}} \right),$$

$p_{lh}$ ,  $p_{hh}$  – концентрації,  $\tau_{lh}$ ,  $\tau_{hh}$  – часи релаксації,  $m_{lh}$ ,  $m_{hh}$  – ефективні маси відповідно легких і важких дірок.

Або ж залежністю [3], так званого коефіцієнта п'єзоопору від одновісної деформації, прикладеної в напрямку [111]:

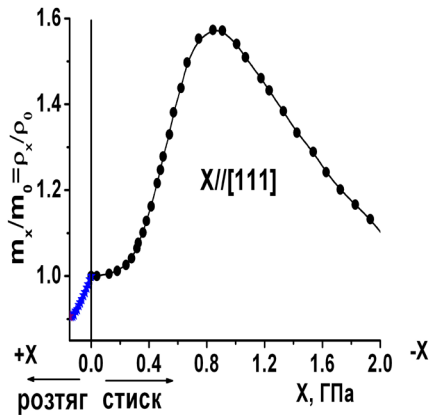
$$\pi_{111}^\sigma = \frac{1}{Y_{111}} \frac{d[\ln(m_o^*/m^*)]}{d\varepsilon_{111}}, \quad (3)$$

де  $Y_{111}$  – модуль Юнга,  $\varepsilon$  – одновісна пружна деформація кристалу.

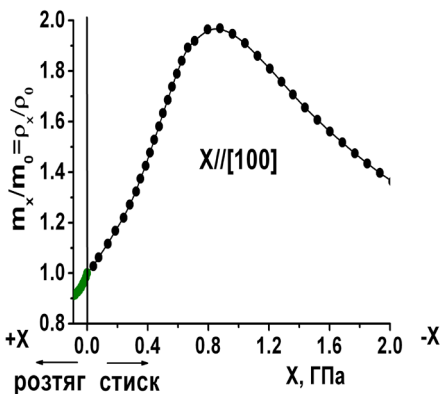
Ми провели експерименти, що включають області розтягування і стиснення вироджених кристалів р-кремнію. Було показано, що має місце досить різка залежність питомого опору від одновісної деформації, що визначається тільки зміною ефективної маси дірок. Цей ефект пов'язаний безпосередньо зі зміною симетрії кристалу при різних напрямках одновісної деформації X//[111], X//[110], X//[100], (Рис. 3 а, б, в).

Симетрія при цьому змінюється наступним чином [4]. При X//[111] відбувається перетворення кубічної симетрії в симетрію ромбодричного типу. Для випадку X//[110] кубічна симетрія кристалу трансформується в ромбічну. І нарешті, при X//[100] кубічна симетрія кристала перетвориться в тетрагональну симетрію. Всі ці перетворення спостерігаються в умовах чистого розтягування і далі із збільшенням одновісної деформації стиску переходимо до умов чистого стиснення кристалів. При переході з області розтягування до області стиснення змінюється характер залежності ефективної маси дірок від величини одновіс-

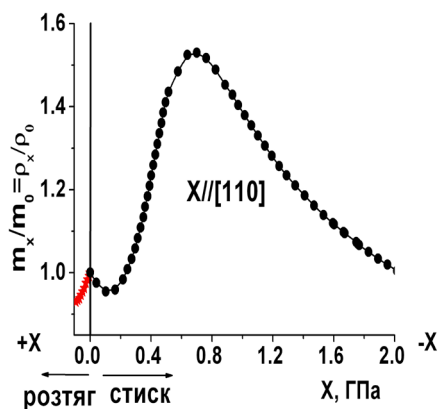
ної деформації. В невироджених кристалах ці зміни ефективної маси призводять до суттєвих змін явищ переносу. При цьому крім зміни ефективної маси необхідно враховувати також і зміну рухливості дірок або електронів.



а



б



в

Рис.3. Залежність  $\rho/\rho_0=f(X)$  p-Si(B) ( $n_e=1 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>) для різних напрямків одновісної деформації: а) X//[111], б) X//[110], в) X//[100].

## ВИСНОВКИ

Таким чином, експерименти проведені на вироджених об'ємних кристалах p-Si підтвердили залежність ефективної маси дірок від величини одновісної деформації в області зміни симетрії кристалу. Тому при поясненні механізму ефекту гігантського п'єзоопору [3, 5] слід враховувати зміну симетрії як монокристалів так і нанопровідників. Це підтверджується істотним скороченням лінійної області в залежності  $m_0/m = f(\epsilon)$  для нанопровідника p-Si [3,5]. Додамо, що автори роботи [6] заперечують існування гігантського п'єзоопору в нанопровідниках p-Si, пояснюючи це хибною інтерпретацією експериментальних даних, одержаних раніше в роботах [3,4]

## ЛІТЕРАТУРА

1. Панков Ю.М. Пьезоопір у тонких шарах і мікрокристалах кремнію та германію р-типу провідності і сенсори на їх основі: Дис. канд. фіз.-мат. наук, Львів, 1999. – 189 с.
2. Коломеец В.В., Ермаков В.Н., Сусь Б.А., Родионов В.Е. Установка для создания одноосных деформаций твердых тел. Патент России № 2040785, 1995.
3. J.X.Cao, X.G.Gong, and R.Q.Wu, Giant piezoresistance and its origin in Si(111) nanowires: First-principles calculations // Phys. Rev. B. –75, 233302 (2007).
4. Бир Г.Л., Пикус Г.Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. Наук, М. 584с. (1972).
5. R.He and P.Yang, Giant piezoresistance effect in silicon nanowires. // Nature Nanotechnology 1, 42 - 46 (2006).
6. Milne J. S., Rowe A. C. H., Arscott S., Renner Ch. Giant Piezoresistance Effects in Silicon Nanowires and Microwires // 105, p.226802 (2010).