

ДЕФОРМАЦІЙНО СТИМУЛЬОВАНІ ЕФЕКТИ В МІКРОСТРУКТУРАХ АНТИМОНІДУ ІНДІЮ ЗА КРІОГЕННИХ ТЕМПЕРАТУР ДЛЯ СЕНСОРНИХ ЗАСТОСУВАНЬ

Д. т. н. А. Дружинін, д. т. н. І. Островський, д. т. н. Ю. Ховерко, к. т. н. Н. Лях-Кагуй,
О. Пасинкова

Національний університет «Львівська політехніка»
Україна, м. Львів
druzh@polynet.lviv.ua

Досліджено вплив деформації на електрофізичні параметри ниткоподібних кристалів антимоніда індію за криогенних температур у сильних магнітних полях до 10 Тл. Встановлено, що для сильнолегованих мікрокристалів InSb з концентрацією легуючої домішки $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ коефіцієнт тензочутливості за температури рідкого гелію становить приблизно 72. Для розробки датчиків магнітного поля, дія яких основана на магніторезистивному принципі, використано ефект гігантського магнетоопору, який досягає 720% за температури 4,2 К.

Ключові слова: ниткоподібні кристали InSb, коефіцієнт тензочутливості, магнетоопір, криогенні температури.

Попередні дослідження, що були проведені для мікрокристалів InSb за криогенних температур в сильних магнітних полях до 14 Тл, дозволили виявити ряд ефектів (осциляції Шубнікова — де Гааза, ефект Кондо) та оцінити низку електрофізичних параметрів, таких як період осциляцій, температуру Дінгла, виявити гігантський магнетоопір та від'ємний магнетоопір, що пов'язані зі значною спінорбітальною обмінною взаємодією [1]. Більше того, вплив зовнішніх чинників, таких як деформація, дозволили виявити виникнення фази Бері в повздовжньому магнетоопорі [2]. З іншого боку, відомо, що на основі кристалів InSb створюють високочутливі холлівські сенсори магнітного поля [3, 4]. При цьому невирішеною залишається проблема створення багатофункційних сенсорів, дієздатних у складних умовах експлуатації.

Метою даної роботи є вивчення впливу деформаційно стимульованих ефектів на поперечний магнетоопір мікрокристалів антимоніду індію n -типу провідності за криогенних температур і в сильних магнітних полях (до 10 Тл). Результати досліджень дозволять прогнозувати можливість застосування таких кристалів у сенсорах деформації та магнітного поля, дія яких основана на магніторезистивному принципі, працездатних у складних умовах експлуатації.

Ниткоподібні кристали InSb вирощували методом хімічних газотранспортних реакцій у закритій бромідній системі. Легування кристалів в процесі росту проводилось домішкою олова до концентрації від $6 \cdot 10^{16}$ до $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для оцінки можливості застосування мікрокристалів InSb в сенсорах механічних величин була застосована методика одновісної деформації зразків за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення матеріалів кристалу та підкладки, на якій закріплено зразок.

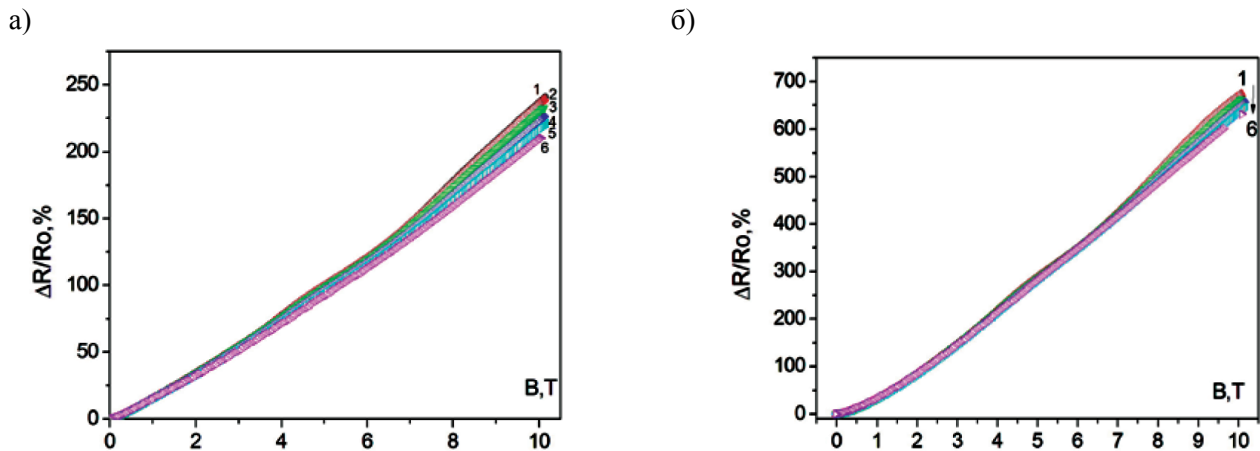
Для ниткоподібних кристалів InSb було оцінено коефіцієнт тензочутливості за низьких температур, який можна визначити як

$$K = \frac{R - R_0}{R_0 \varepsilon},$$

де R_0 — опір недеформованого (вільного) кристала; R — опір деформованого кристала; ε — одновісна деформація, яка діє на кристал.

Результати експериментальних досліджень поперечного магнетоопору для деформованих зразків із концентрацією легуючої домішки $6 \cdot 10^{17}$ та $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, що відповідає близькості до фазового переходу «метал — діелектрик», наведено на рисунку. Як видно з рис. а, для деформованих мікрокристалів InSb із концентрацією домішки $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, що відповідає фазовому переходу «метал — діелектрик» із металевого боку, спостерігається значне зростання магнетоопору (приблизно 250%). Ймовір-

ною причиною зростання магнетоопору в таких кристалах є вивільнення «виморожених» надлишкових носіїв заряду, а відтак, і збільшення їхньої середньої рухливості. Це приводить до лінеаризації характеристик і зменшення температурного коефіцієнта опору кристалів InSb в інтервалі температур 4,2—70 К.



Поперечний магнетоопір деформованих мікрочастин InSb, легованих оловом до концентрації $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (а) та $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (б), в інтервалі температур 4,2—70 К (криві 1—6 відповідно)

Для деформованих мікрочастин InSb, легованих до концентрації $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, яка відповідає фазовому переходу «метал — діелектрик», спостерігається гігантський магнетоопір, що досягає 720% (рис. б), однак з меншими значеннями температурного коефіцієнту магнетоопору за температур 4,2—70 К, що збільшує чутливість до магнітного поля. Визначено, що за температури рідкого гелію коефіцієнт тензочутливості мікрочастин InSb з концентрацією домішки $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ становить 72, з концентрацією $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ — 47 при $\varepsilon = -3 \cdot 10^{-4}$ відн. од.

Для розроблення сенсорів магнітного поля з магніторезистивним принципом дії використано ефект гігантського магнетоопору, виявлений у деформованих зразках на основі мікрочастин InSb з концентрацією легуючої домішки, що відповідає переходу «метал — діелектрик» $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ і досягає 720% за температури 4,2 К. Розроблений мікроелектронний сенсор має надвисоку чутливість до магнітного поля, що становить 1500 мВ/Тл, а простота конструкції забезпечує малу інерційність і водночас високу швидкодію.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y. et al. Peculiarities of magnetoresistance in InSb whiskers at cryogenic temperatures // *Materials Research Bulletin*.— 2015.— Vol. 72.— P. 324–330.
2. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Liakh-Kaguy N., Rogacki K. Berry phase in strained InSb whiskers // *Low Temperature Physics*.— 2018.— Vol. 44.— P. 1189–1194.
3. Sandhu A., Sanbonsugi H., Shibasaki I. et al. High sensitivity InSb ultra-thin film micro-Hall sensors for bio-screening applications // *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2. Lett.*— 2004.— Vol. 43.— P. 4–7.
4. Tsukasa Takamura, Pil Ju Ko, Jaiyam Sharma et al. Magnetic-Particle-Sensing Based Diagnostic Protocols and Applications // *Sensors (Basel)*.— 2015.— Vol. 15, No.6.— P. 12983–12998.

A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Y. Khoverko, N. Liakh-Kaguy, O. Pasyukova

Deformation stimulated effects in microstructures of indium antimonide at cryogenic temperatures for sensor applications

The study investigates the effect of deformation on the electrophysical parameters of the indium antimonide microcrystals at the cryogenic temperatures in strong magnetic fields up to 10 T. It is determined that for strongly doped crystals the gauge factor at liquid-helium temperature is approximately 72 for InSb microcrystals with the charge carriers concentration of $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. For the development of magnetic field sensors which operate on the magneto-resistive principle, the effect of a giant magnetic resistivity (reaching 720% at a temperature of 4.2 K) is used.

Keywords: InSb whiskers, gauge factor, magnetoresistance, cryogenic temperatures.