

---

# МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

---

## SENSOR MATERIALS

---

УДК 621.315.592; PACS number(s): 72.20.Mv, 72.80.Tm

DOI

### РОЗРОБКА ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ МОНОКРИСТАЛІВ ГЕРМАНІЮ ВІД ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА РАДІАЦІЇ

*Ю. А. Удовицька<sup>1</sup>, С. В. Луньов<sup>1</sup>, В. П. Кашицький<sup>1</sup>, В. Т. Маслюк<sup>2</sup>, І. Г. Мегела<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет, вул. Львівська 75, м. Луцьк, 43018,  
luniovser@ukr.net,

<sup>2</sup>Інститут електронної фізики НАН, вул. Університетська, 21, м. Ужгород, 88017, volodymyr.maslyuk@gmail.com

### РОЗРОБКА ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ МОНОКРИСТАЛІВ ГЕРМАНІЮ ВІД ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА РАДІАЦІЇ

*Ю. А. Удовицька, С. В. Луньов, В. П. Кашицький, В. Т. Маслюк, І. Г. Мегела*

Анотація. На основі вимірювань ефекту Холла одержано залежності ЕРС Холла від індукції зовнішнього магнітного поля для опромінених електронами з енергією 10 MeV та потоком  $\Phi=5 \cdot 10^{15}$  ел./см<sup>2</sup> монокристалів n-Ge, покритих шаром епоксидно-діанової смоли без наповнювачів та з наповнювачами порошоків заліза та алюмінію. З аналізу даних залежностей слідує, що вони є лінійними для монокристалів германію, покритих шаром епоксидної смоли без наповнювача та з наповнювачем порошку алюмінію у всьому діапазоні досліджуваних магнітних полів. Для зразків германію, покритих шаром епоксидної смоли з наповнювачем порошку заліза, спостерігається незначне відхилення від лінійності таких залежностей при магнітних полях до 0,3 Тл, що пояснюється додатковим намагніченням порошку заліза. Встановлено, що наявність захисного шару з епоксидної смоли значно знижує чутливість монокристалів германію до впливу зовнішнього магнітного поля. Наявність залишкового намагнічення для опромінених монокристалів n-Ge, покритих шаром епоксидної смоли з наповнювачем порошку заліза, може бути використане для розробки на основі даних монокристалів систем акумулювання енергії.

**Ключові слова:** ефект Холла, епоксидна смола, монокристали германію, магнітна чутливість, залишкове намагнічення, радіаційні дефекти.

## **DEVELOPMENT OF PROTECTIVE COATINGS BASED ON EPOXY COMPOSITE MATERIALS FOR GERMANIUM SINGLE CRYSTALS FROM THE INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD AND RADIATION**

*Yu. A. Udovytska, S. V. Luniov, V. P. Kashytskyi, V. T. Maslyuk, I. G. Megela*

Abstract. On the basis of the Hall effect measurements, the dependencies of the Hall EMF on the induction of an external magnetic field for the electron irradiated n-Ge single crystals, coated with a layer of the epoxy-dianon resin (without fillers and with fillers of the powders of iron and aluminum) have been obtained. These single crystals were irradiated by the electrons with an energy of 10 MeV and the flow of  $\Omega=5 \cdot 10^{15}$  el./cm<sup>2</sup>. From the analysis of these dependencies it follows that they are linear for germanium single crystals, coated with a layer of epoxy resin without filler and with the filler of aluminum powder in the whole range of investigated magnetic fields. For germanium samples, coated with a layer of epoxy resin with filler of an iron powder, there is a slight deviation from the linearity of such dependencies for the magnetic fields up to 0,3 T, which is explained by the additional magnetization of iron powder. It was established that the presence of a protective epoxy resin layer significantly reduces the sensitivity of germanium single crystals to the influence of an external magnetic field. The presence of residual magnetization for irradiated n-Ge single crystals, coated with an epoxy resin with the filler of iron powder can be used for developing an energy storage systems based on such single crystals.

Keywords: Hall effect, epoxy resin, germanium single crystals, magnetic sensitivity, residual magnetization, radiation defects

## **РАЗРАБОТКА ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И РАДИАЦИИ**

*Ю. А. Удовицкая, С. В. Лунёв, В. П. Кашицкий, В. Т. Маслюк, И. Г. Мегела*

Аннотация. На основе измерений эффекта Холла получены зависимости ЭДС Холла от индукции внешнего магнитного поля для облученных электронами с энергией 10 МэВ и потоком  $\Phi=5 \cdot 10^{15}$  эл./см<sup>2</sup> монокристаллов n-Ge, покрытых слоем эпоксидно-диановой смолы без наполнителей и с наполнителями порошков железа и алюминия. Из анализа данных зависимостей следует, что они являются линейными для монокристаллов германия, покрытых слоем эпоксидной смолы без наполнителя и с наполнителем порошка алюминия во всем диапазоне исследуемых магнитных полей. Для образцов германия, покрытых слоем эпоксидной смолы с наполнителем порошка железа, наблюдается незначительное отклонение от линейности таких зависимостей при магнитных полях до 0,3 Тл, что объясняется дополнительным намагничиванием порошка железа. Установлено, что наличие защитного слоя из эпоксидной смолы значительно снижает чувствительность монокристаллов германия к воздействию внешнего магнитного поля. Наличие остаточного намагничивания для облученных монокристаллов n-Ge, покрытых слоем эпоксидной смолы с наполнителем по-

рошка железа, может быть использовано для разработки на основе данных монокристаллов систем аккумулирования энергии.

Ключевые слова: эффект Холла, эпоксидная смола, монокристаллы германия, магнитная чувствительность, остаточное намагничивание, радиационные дефекты

## ВСТУП

Експлуатаційні властивості напівпровідникових пристроїв на основі гальваноманітних явищ істотно залежать як від властивостей та особливостей напівпровідникового матеріалу, так і від технології виготовлення їх робочих елементів [1]. Вимірювання Ефекту Холла дозволяє визначити концентрацію та рухливість носіїв заряду, а в деяких випадках – тип носіїв заряду в металі або напівпровіднику, що робить його досить ефективним методом дослідження властивостей напівпровідників. На основі ефекту Холла працюють датчики Холла – прилади, що вимірюють напруженість (індукцію) магнітного поля і також використовуються в якості магнітних перетворювачів при вимірюванні струмів складної форми, у тому числі таких, що мають постійну складову [2]. Для виготовлення напівпровідникових датчиків Холла використовуються такі матеріали, як Si; Ge; HgTe; HgSe; GaAs; InSb; InAs та інші. В даному відношенні монокристалічний кремній та германій займають передові позиції завдяки унікальним своїм властивостям, комерційній доступності та добре розробленій технології вирощування [3,4]. При практичному використанні датчиків Холла зустрічаються завдання двох типів [5,6]. В одному випадку потрібне отримання максимальної, при даній потужності розсіювання, ЕРС Холла, причому вхідний опір схеми може бути як завгодно великим. В другому випадку метою є отримання максимальної потужності в ланцюзі Холла. Для здійснення оптимальних за своїми параметрами датчиків Холла, що працюють за першим принципом, необхідно виготовляти їх з матеріалу, що має малу концентрацією носіїв заряду одного знаку, тобто велике значення сталої Холла. У другому випадку для узгодження датчика з приладом матеріал повинен задовольняти двом умовам: опір зразка не повинен бути занадто малим

і рухливість носіїв заряду має бути достатньо високою. Датчики Холла стали частиною багатьох приладів. Вони використовуються для вимірювання індукції магнітного поля та безконтактного визначення механічних та електричних впливів (реле, датчики положення, вимірювачі струму та потужності, запобіжники і т.д.), в медицині, машинобудуванні, в дефектоскопії, в геології при дослідженнях нових родовищ, при створенні систем позиціонування та навігації [7-11]. В основному за прямим призначенням їх використовують для вимірювань напруженості магнітного поля та навіть у таких інноваціях, як іонні двигуни ракет. Найчастіше з датчиками Холла доводиться стикатися при використанні систем запалювання автомобіля.

Також часто постає і третє важливе завдання при практичному використанні будь-яких датчиків, зокрема і датчиків Холла, – їх захист від агресивного впливу навколишнього середовища та різного роду фізичних полів. Це вимагає розробки простих, легких, відносно дешевих та технологічних захисних покриттів. В даному сенсі епоксикомпозити є перспективними матеріалами. Також в багатьох випадках наявність таких захисних покриттів для елементів напівпровідникової електроніки дозволяє розширити їх функціональні властивості та сферу експлуатації.

Тому цікавим з практичної точки зору є розробка захисних покриттів на основі епокси-комполімерних матеріалів для монокристалів германію, які можуть бути використанні для конструювання датчиків Холла, що функціонують в екстремальних умовах дії значних радіаційних та магнітних полів.

## МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Досліджувані монокристали n-Ge були вирощені за методом Чохральського та в процесі вирощування легувались домішкою Sb,

концентрацією  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Зразки германію виготовлялись у формі прямокутного паралелепіпеда, розмірами  $1,3 \times 1,3 \times 5$  мм. На одержані зразки германію наносився шар епоксикомпозиту. Для цього в заготовлену форму у вигляді паралелепіпеда з картону вставлявся зразок германію. В картоні в необхідних точках для виводу провідників, які підпаювались до зразка, робились маленькі отвори, через які протягувались провідники. Потім у форму заливався епоксикомпозит, який покривав германієвий зразок. Шар епоксикомпозиту являв собою епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20 з твердником ПЕПА (12 мас.ч. на 100 мас. ч. епоксидної смоли) (без наповнювачів) та з наповнювачами порошоків заліза та алюмінію (30 мас. ч.). Процес тверднення епоксидно-діанової смоли тривав 24 години за нормальних умов. Додаткова термічна обробка здійснювалась в печі при температурах  $70 \dots 130^\circ\text{C}$ . Готовий зразок для проведення досліджень представлено на рис. 1. Після термічної обробки дані зразки опромінювались в Інституті електронної фізики на мікротроні М-30 прискореними електронами з енергією 10 МеВ та потком  $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ ел./см}^2$ . Контроль температури опромінювання здійснювався за допомогою мідь-константанової термопарі, для якої, як встановлено, параметри є стійкими до тривалої дії радіації. За час опромінювання зміни температури не перевищували  $\pm 2^\circ\text{C}$  і регулювались шляхом обдуву рідким азотом. Досліджуваний зразок закріплювався на спеціальному держаку та поміщався між полюси електромагніту, перпендикулярно до силових ліній індукції магнітного поля. Магнітне поле за допомогою електромагніту плавно змінювалось під час експерименту від 0 до 0,5 Тл. На контакти 1 та 2 подавався стабілізований постійний струм, а з контактів 3 та 4 знімалась ЕРС Холла. Для вимірювання залежностей ЕРС Холла від індукції зовнішнього магнітного поля при різних температурах зразки германію обдувались парами азоту. Контроль температури зразка здійснювались за допомогою мідь-константанової диференціальної термопарі. При цьому один із спаїв опускався в посудину Дюара з сумішшю води та льоду ( $T = 273 \text{ K}$ ), а другий фіксувався без-

посередньо біля досліджуваного зразка. Вимірювання ЕРС термопарі та спаду напруги на різних контактах зразка проводились за допомогою цифрових вольтметрів В7-21А.

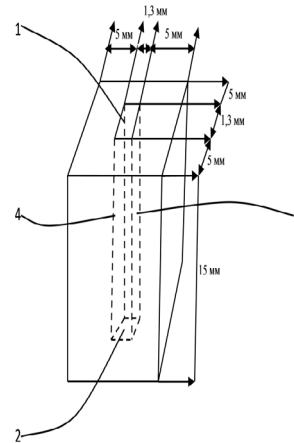


Рис. 1. Форма та розміри зразка германію, покритого шаром полімеркомпозиту.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В даній роботі досліджувався вплив опромінення електронами з енергією 10 МеВ та потоком  $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ ел./см}^2$  на магнітну чутливість монокристалів n-Ge, покритих шаром епоксиполімеру. В результаті вимірювань ефекту Холла були одержані залежності холівської напруги  $U_H$  від індукції магнітного поля  $B$  при різних температурах (рис. 2-4).

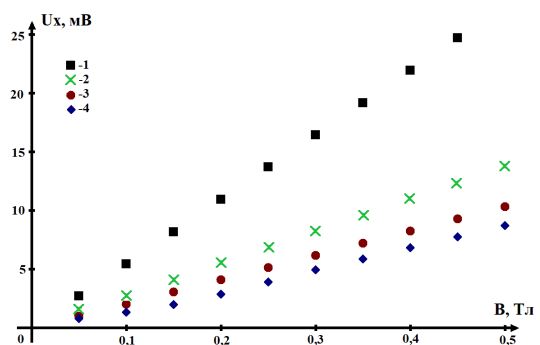


Рис. 2. Залежності холівської напруги від індукції зовнішнього магнітного поля при  $T = 300 \text{ K}$  для опромінених монокристалів n-Ge з різними типом зовнішнього шару покриття: 1 – без покриття, 2 – шар епоксикомпозиту без наповнювачів, 3 – шар епоксикомпозиту з наповнювачем порошку алюмінію, 4 – шар епоксикомпозиту з наповнювачем порошку заліза.

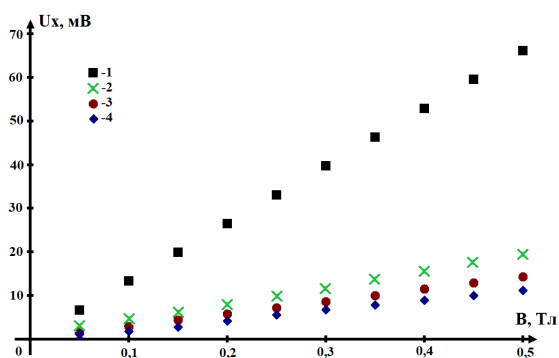


Рис. 3. Залежності холівської напруги від індукції зовнішнього магнітного поля при  $T=240$  К для опромінених монокристалів  $n$ -Ge з різними типом зовнішнього шару покриття: 1 – без покриття, 2 – шар епоксикомпозиту без наповнювачів, 3 – шар епоксикомпозиту з наповнювачем порошку алюмінію, 4 – шар епоксикомпозиту з наповнювачем порошку заліза.

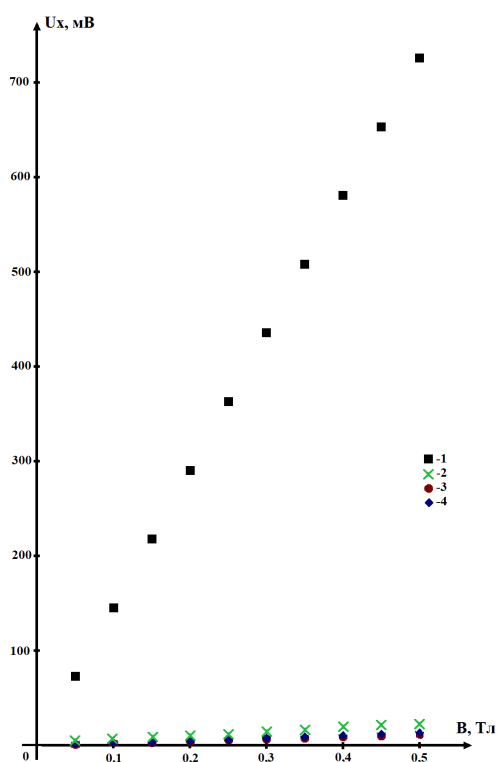


Рис. 4. Залежності холівської напруги від індукції зовнішнього магнітного поля при  $T=190$  К для опромінених монокристалів  $n$ -Ge з різними типом зовнішнього шару покриття: 1 – без покриття, 2 – шар епоксикомпозиту без наповнювачів, 3 – шар епоксикомпозиту з наповнювачем порошку алюмінію, 4 – шар епоксикомпозиту з наповнювачем порошку заліза.

Як слідує з даних рисунків, залежності  $U_H=f(B)$  є лінійними для монокристалів германію, покритих шаром епоксидної смоли без наповнювача та з наповнювачем порошку алюмінію у всьому діапазоні досліджуваних магнітних полів. Дані залежності свідчать про другорядну роль ефекту магнітоопору, який може проявлятися для монокристалів германію з кисневмісними комплексами при більших значеннях магнітних полів [12]. Для зразків германію, покритих шаром епоксикомпозиту з наповнювачем порошку заліза, спостерігається незначне відхилення від лінійності залежності  $U_H=f(B)$  при магнітних полях до 0,3 Тл (див. рис. 2–4, криві 4). Це можна пояснити тим, що при поміщенні таких зразків в магнітне поле, відбувається намагнічення порошку заліза, магнітне поле якого додатково впливає на германієвий зразок і цим самим змінює ЕРС Холла. Підтвердженням існування додаткового магнітного поля є наявність залишкового намагнічення, яке створює ЕРС Холла, після «виключення» зовнішнього магнітного поля. Залежності ЕРС Холла від часу при відсутності зовнішнього магнітного поля для різних температур представлені на рис. 4. Як слідує з рис. 4, залишкове намагнічення порошку заліза, який є наповнювачем для епоксидної смоли, створює ЕРС Холла 2,123 мВ, 1,967 мВ та 1,552 мВ при температурах 190 К, 240 К та 300 К відповідно. Найбільш швидко (більше як в 10 разів за 2 години) зменшується ЕРС Холла при  $T=300$  К (рис. 5, крива 3). Це пов'язано з тим, що зростання температури призводить до зменшення ступеня направленої орієнтації магнітних полів окремих доменів порошка заліза [13].

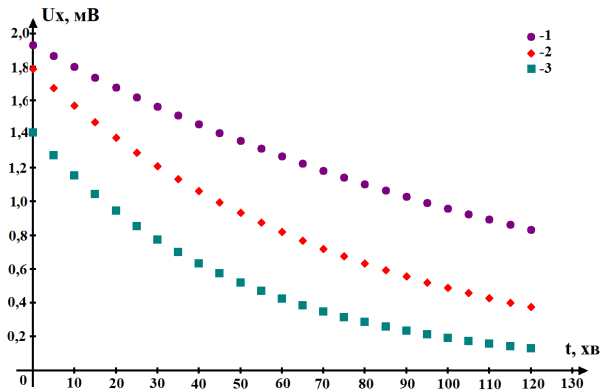


Рис. 5. Залежність  $U_x(t)$  при намагніченні полем  $B=0,5$  Тл для опромінених монокристалів n-Ge, покритих шаром епоксикомпозиту з наповнювачем порошку заліза: 1 –  $T=190$  К; 2 –  $T=240$  К; 3 –  $T=300$  К.

Коли напрямок струму та магнітного поля взаємно перпендикулярні, то згідно з [14], ЕРС Холла  $U_H$  можна записати у вигляді:

$$U_x = \frac{R_x B}{d} \quad (1)$$

де  $R_x$  – стала Холла,  $I$  – сила струму, яка протікає через зразок,  $B$  – індукція магнітного поля,  $d$  – товщина зразка в напрямку магнітного поля.

Однією з основних характеристик датчиків Холла є магнітна чутливість  $\beta$  [15,16]

$$\beta = \frac{\partial U_x}{\partial B} = \frac{R_x I}{d} \quad (2)$$

Як відомо [14], стала Холла визначається так:

$$R_x = \frac{A}{q \cdot n}, \quad (3)$$

де  $q$  – модуль заряду електрона,  $A$  – холл-фактор,  $n$  – концентрація електронів провідності. Холл-фактор залежить від умов, при яких відбуваються вимірювання (температура, концентрація легуючої домішки, величина магнітного поля). Наближено його можна вважати для різних умов експерименту близьким до 1 для невеликих магнітних полів, коли не проявляється ефект магнітоопору. Тоді, згідно з (2) та (3),

$$n = \frac{A \cdot I \cdot B}{U_x \cdot d \cdot q} \quad (4)$$

Згідно з виразами (1–4), зростання ЕРС Холла та магнітної чутливості пов'язане, в першу чергу, зі зменшенням концентрації електронів провідності. Як відомо [17], радіаційне опромінення напівпровідників частинками або квантами високих енергій призводить до утворення радіаційних дефектів, які є стійкими до температури. Такі дефекти є компенсуючими центрами по відношенню до основних носіїв струму і можуть локалізувати електрони. Це призводить до зменшення концентрації електронів провідності. Тому зменшення ЕРС Холла та магнітної чутливості опромінених зразків германію, покритих шаром епоксидної смоли, пояснюється меншими значеннями концентрацій утворених при електронному опроміненні радіаційних дефектів по відношенню до опромінених монокристалів германію без захисного шару епоксипокриття. Аналітичні залежності ЕРС Холла та магнітної чутливості для різних температур було отримано з використанням методу найменших квадратів. Апроксимаційні поліноми для розрахунку таких залежностей представлено в таблицях 1–3. Розрахунок коефіцієнтів даних поліномів здійснювався за допомогою системи комп'ютерної алгебри MathCad 14.

Таблиця 1.

**Апроксимаційні поліноми для розрахунку ЕРС Холла та магнітної чутливості при  $T=300$  К для опроміненних зразків германію, покритих захисним шаром епоксидної смоли**

Тип зразка	Залежність ЕРС Холла $U_x$ (мВ) від індукції зовнішнього магнітного поля $B$ (Тл)	Залежність магнітної чутливості $\beta$ (мВ/Тл) від індукції зовнішнього магнітного поля $B$ (Тл)
Опромінений монокристал n-Ge без захисного шару епоксипокриття	$U_x = 55B$	55
Опромінений монокристал n-Ge, покритий шаром епоксидної смоли з твердником ПЕПА (12 мас.ч.)	$U_x = 27,51B$	27,51
Опромінений монокристал n-Ge, покритий шаром епоксидної смоли з твердником ПЕПА (12 мас.ч.) та з наповнювачем порошку алюмінію (30 мас.ч.)	$U_x = 20,75B$	20,75
Опромінений монокристал n-Ge, покритий шаром епоксидної смоли з твердником ПЕПА (12 мас.ч.) та з наповнювачем порошку заліза (30 мас.ч.)	$U_x = \begin{cases} 28,89B^2 + 6,659B + 0,43, & B < 0,3, \\ 18,92B, & B \geq 0,3 \end{cases}$	$\beta = \begin{cases} 57,78B + 6,659, & B < 0,3, \\ 18,92, & B \geq 0,3 \end{cases}$

Таблиця 2.

**Апроксимаційні поліноми для розрахунку ЕРС Холла та магнітної чутливості при  $T=240$  К для опроміненних зразків германію, покритих захисним шаром епоксидної смоли**

Тип зразка	Залежність ЕРС Холла $U_x$ (мВ) від індукції зовнішнього магнітного поля $B$ (Тл)	Залежність магнітної чутливості $\beta$ (мВ/Тл) від індукції зовнішнього магнітного поля $B$ (Тл)
Опромінений монокристал n-Ge без захисного шару епоксипокриття	$U_x = 132B$	132
Опромінений монокристал n-Ge, покритий шаром епоксидної смоли з твердником ПЕПА (12 мас.ч.)	$U_x = 38,9B$	38,9
Опромінений монокристал n-Ge, покритий шаром епоксидної смоли з твердником ПЕПА (12 мас.ч.) та з наповнювачем порошку алюмінію (30 мас.ч.)	$U_x = 28,44B$	28,44
Опромінений монокристал n-Ge, покритий шаром епоксидної смоли з твердником ПЕПА (12 мас.ч.) та з наповнювачем порошку заліза (30 мас.ч.)	$U_x = \begin{cases} 30,12B^2 + 12,6B + 0,276, & B < 0,3, \\ 22,08B, & B \geq 0,3 \end{cases}$	$\beta = \begin{cases} 60,24B + 12,6, & B < 0,3, \\ 22,08, & B \geq 0,3 \end{cases}$



Таблиця 3.

**Апроксимаційні поліноми для розрахунку ЕРС Холла та магнітної чутливості при  $T=190$  К для опромінених зразків германію, покритих захисним шаром епоксидної смоли**

Тип зразка	Залежність ЕРС Холла $U_x$ (мВ) від індукції зовнішнього магнітного поля $B$ (Тл)	Залежність магнітної чутливості $\beta$ (мВ/Тл) від індукції зовнішнього магнітного поля $B$ (Тл)
Опромінений монокристал n-Ge без захисного шару епоксипокриття	$U_x = 1452B$	1452
Опромінений монокристал n-Ge, покритий шаром епоксидної смоли з твердником ПЕПА (12 мас.ч.)	$U_x = 52,7B$	52,7
Опромінений монокристал n-Ge, покритий шаром епоксидної смоли з твердником ПЕПА (12 мас.ч.) та з наповнювачем порошку алюмінію (30 мас.ч.)	$U_x = 36,5B$	36,5
Опромінений монокристал n-Ge, покритий шаром епоксидної смоли з твердником ПЕПА (12 мас.ч.) та з наповнювачем порошку заліза (30 мас.ч.)	$U_x = \begin{cases} 32,85B^2 + 13,55B + 0,54, & B < 0,3, \\ 26,74B, & B \geq 0,3 \end{cases}$	$\beta = \begin{cases} 65,7B + 13,55, & B < 0,3, \\ 26,74, & B \geq 0,3 \end{cases}$

Як слідує з таблиць 1–3, магнітна чутливість зростає з пониженням температури, що пояснюється деіонізацією утворених радіаційних дефектів. Магнітна чутливість для монокристалів германію, покритих шаром епоксидної смоли без наповнювачів та з наповнювачем порошку алюмінію, не залежить від індукції зовнішнього магнітного поля, а для зразків германію, покритих шаром епоксидної смоли з наповнювачем порошку заліза, лінійно зростає при збільшенні магнітного поля до 0,3 Тл. Введення металевих наповнювачів порошків алюмінію та заліза в полімерну матрицю, перш за все, призведе до зменшення середньої довжини пробігу електронів в полімеркомполімері [18] та відповідно до зростання його екрануючої здатності від електронного опромінення та підвищення радіаційної стійкості германію та датчиків Холла, виготовлених на його основі. При проходженні заряджених частинок через шар заліза, за рахунок оптимального співвідношення між його густиною, масовим та зарядовим числом, втрати енергії цих частинок на іонізацію та випромінювання будуть більшими для заліза, ніж для багатьох іншими металів, зокрема для алюмінію [18]. Тому в даному відношенні захисне покриття у вигляді шару епоксидної смоли з наповнювачем порошку заліза від агресивного впливу на монокристали германію радіаційного опромінення є кращим за покриття шару епоксидної смоли, наповненого порошком алюмінію. Недоліком магніточутливого елемента, який може бути одержаний на основі монокристалу германію, покритого шаром епоксидної смоли з наповнювачем порошку заліза, є залежність ЕРС Холла від часу вимірювань. Даний недолік можна усунути додатковою часовою калібруванням сигналу, подібно до температурної калібрування сигналу, яка використовується в подвійних датчиках магнітного поля та температури [19, 20].

## ВИСНОВКИ

На основі одержаних результатів та проведених розрахунків встановлено, що наявність захисного шару з епоксидної смоли з

твердником ПЕПА (12 мас.ч.) без наповнювачів та з наповнювачами порошків заліза та алюмінію значно підвищує захист монокристалів германію від дії значних радіаційних та магнітних полів, внаслідок чого зменшується радіаційна стійкість германію та виникають нелінійні ефекти, наприклад, магнітоопір. Це є важливим при конструюванні на основі германію датчиків Холла, що можуть функціонувати в екстремальних умовах дії таких полів. Наявність залишкового намагнічення наповнювача порошку заліза та відповідно індуковане додаткове ЕРС Холла може мати практичне значення при розробці на основі опромінених монокристалів n-Ge, покритих шаром епоксидної смоли з наповнювачем порошку заліза, систем акумулювання енергії. Такі дослідження відносяться до пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки як в Україні, так і закордоном. Отримані на основі методу найменших квадратів апроксимаційні поліноми для розрахунку ЕРС Холла та магнітної чутливості можуть бути використані при теоретичному описі різних гальваномагнітних ефектів в монокристалах германію, покритих шаром епоксидної смоли, при наявності таких радіаційних дефектів.

Дослідження в роботі виконані за рахунок коштів державного бюджету України по проекту «Розробка комплексу керованих властивостей багатодолинних напівпровідників та полімеркомполімерних матеріалів для функціонування в екстремальних умовах експлуатації», номер державної реєстрації 0117U000630.

## Список використаної літератури

- [1]. V. A. Antropov, L. Kh. Antropova. Prymenenye halvanomahnitnykh yavleniy v poluprovodnykakh dlia sozdaniya pryborov y ustroystv SVCh dyapazona. PHU, Penza, 166 s. (2011).
- [2]. S. Tumanski. Modern magnetic field sensors – a review // Przegląd elektrotechniczny, 10, pp. 1–12 (2013).
- [3]. C. Claes, E. Simoen. Germanium-Based Technologies. Elsevir, Oxford, 449 p. (2007).
- [4]. S. Fumio. Semiconductor Silicon Crystal

- Technology. Elsevier Science & Technology, p. 435 (2012).
- [5]. O. V. Osadchuk, O. P. Bilylivska, O. M. Zhahlovska. Ohliad halvanomahnitnykh vymirivachiv parametriv mahnitnoho polia. Visnyk NTU «KhPI». 42. s. 948 (2012).
- [6]. H. Portnoi. Sovremennye mahnytochuvstvytelnye datchyky Khollo i prybory na ykh osnove. Vestnyk avtomatyzatsyy. 1 (39). s. 7-12 (2013).
- [7]. Ch. Schott, P.-A. Besse, R. S. Popovic. Planar Hall effect in the vertical Hall sensor // Sensors and Actuators A: Physical. 85, Issues 1-3. pp. 111-115 (2000).
- [8]. A. F. Kaperko. Analiz sostoyaniya, tendentsii razvitiya i novyye razrabotki datchikov preobrazovateley informatsii sistem izmereniya, kontrolya i upravleniya // Izmeritel'naya tekhnika, № 1, s. 3-7 (1998).
- [9]. Jesus A. Tapia et al. Sensing magnetic flux density of artificial neurons with a MEMS device // Biomed Microdevices, 13, 2, pp. 303-313 (2011).
- [10]. J. Lenz, S. Edelstein. Magnetic sensors and their applications // IEEE Sensors Journal, 6(3), pp. 631 – 649 (2006).
- [11]. I. Bichurin, V. Petrov, R.V. Petrov, et al. Magnetoelectric Sensor of Magnetic Field // Ferroelectrics, 280, pp. 199-202 (2002).
- [12]. V. M. Babich, P. I. Baranskii, V. A. Shershel. The influence of oxygen and impurity-oxygen complexes on magnetoresistance of n-Ge in strong magnetic fields // physica status solidi, (b). 42 (1). p. K23-K27 (1970).
- [13]. S. Zhang, D. Zhao. Advances in magnetic materials: processing, properties, and performance. CRC press. 758 p. (2017).
- [14]. E. V. Kuchis. Galvanomagnetic effects and methods of their investigation. Radio and Communication. Moscow. p. 264 (1990).
- [15]. K. Staroverov. Integral Hall Sensors of the "Honeywell". Electronics News, 1, pp. 9-13 (2010)
- [16]. S. V. Luniov et al. The impact of heat treatment on the magnetic sensitivity of irradiated by electrons single crystals n-Ge // Functional materials, 26 (1), pp. 41-47 (2019).
- [17]. V. V. Uhlov. Radyatsyonnye efekty v tverdykh telakh. Mynsk. BHU. 167 p. (2007).
- [18] V. I. Pavlenko, O. D. Edamenko, N. I. Cherkashina, A. V. Noskov. Total energy losses of relativistic electrons passing through a polymer composite // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 8(2), pp. 398-403 (2014).
- [19] V. F. Mitin, N. S. Boltovets, V. V. Kholevchuk et al. Dual function sensors for concurrent measurement of temperature and magnetic field in cryogenic applications // Cryogenics, 48(9), pp. 68-73. (2008).
- [20]. S. Lun'ov, A. Zimych, M. Khvyshchun ta in. Temperaturna hraduyuvannya mahnitochutlyvoho elementa datchyka Khollo na osnovi germaniyi // Tekhnichni visti, 1 (45), 2 (46). - s. 110-113(2017).

Стаття надійшла до редакції 13.09.2019 р.

## DEVELOPMENT OF PROTECTIVE COATINGS BASED ON EPOXY COMPOSITE MATERIALS FOR GERMANIUM SINGLE CRYSTALS FROM THE INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD AND RADIATION

*Yu. A. Udovyt'ska<sup>1</sup>, S. V. Luniov<sup>1</sup>, V. P. Kashytskyi<sup>1</sup>, V. T. Maslyuk<sup>2</sup>, I. G. Megela<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Lutsk National Technical University,

<sup>2</sup>Institute of Electron Physics NAS of Ukraine

### Summary

An important task, which often arises in the practical use of any sensor, including Hall sensors, is their protection against aggressive impact of the environment and various of physical fields. This requires the development of simple, lightweight, relatively inexpensive and technological protective coatings. In this sense, the epoxy composites are promising materials. Therefore, the impact of electron irradiation with an energy of 10 MeV and the flow  $\Omega=5 \cdot 10^{15}$  el./cm<sup>2</sup> on the magnetic sensitivity of n-Ge single crystals, coated with an epoxy composite layer, was investigated in this work. The protective epoxy composite layer was an ED-20 epoxy resin with PEPA hardener (12 parts by weight on 100 parts by weight of epoxy resin) without fillers and with fillers of the iron and aluminum powders (30 parts by weight). On the basis of the Hall effect measurements, the dependencies of the Hall EMF on the induction of an external magnetic field for these n-Ge single crystals have been obtained. The obtained dependencies are linear for the whole range of investigated magnetic fields (from 0 to 0,5 T). Only for germanium samples, coated with a layer of epoxy resin with filler of an iron powder, there is a slight deviation from the linearity of such dependencies for the magnetic fields up to 0,3 T, which is explained by the additional magnetization of iron powder. The presence of residual magnetization of the iron powder filler and the correspondingly induced additional Hall EMF can be used for developing an energy storage systems based on irradiated n-Ge single crystals, coated with an epoxy resin with the filler of iron powder. It was established that the presence of a protective epoxy resin layer significantly increases the protection of germanium single crystals from the influence of large radiation and magnetic fields. This is important in designing Hall sensors based on germanium single crystals, which can function in extreme conditions action of such fields.

**Keywords:** Hall effect, epoxy resin, germanium single crystals, magnetic sensitivity, residual magnetization, radiation defects

УДК 621.315.592; PACS number(s): 72.20.Mu, 72.80.Tm  
DOI

## РОЗРОБКА ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ МОНОКРИСТАЛІВ ГЕРМАНІЮ ВІД ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА РАДІАЦІЇ

*Ю. А. Удовицька<sup>1</sup>, С. В. Луньов<sup>1</sup>, В. П. Кашицький<sup>1</sup>, В. Т. Маслюк<sup>2</sup>, І. Г. Мегела<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет

<sup>2</sup>Інститут електронної фізики НАН

### Реферат

Важливим завданням, яке часто виникає при практичному використанні будь-яких датчиків, зокрема і датчиків Холла, є їх захист від агресивного впливу навколишнього середовища та різних фізичних полів. Це вимагає розробки простих, легких, відносно дешевих та технологічних захисних покриттів. В цьому сенсі епоксикомпозити є перспективними матеріалами. Тому в даній роботі досліджувався вплив опромінення електронами з енергією 10 МеВ та потоком  $\Phi=5 \cdot 10^{15}$  ел./см<sup>2</sup> на магнітну чутливість монокристалів n-Ge, покритих шаром епоксикомпозиту. Захисний шар епоксикомпозиту являв собою епоксидно-діанову смолу марки ЕД–20 з твердником ПЕПА (12 мас.ч. на 100 мас. ч. епоксидної смоли) без наповнювачів та з наповнювачами порошків заліза та алюмінію (30 мас. ч.). На основі вимірювань ефекту Холла одержано залежності ЕРС Холла від індукції зовнішнього магнітного поля для цих монокристалів n-Ge. Одержані залежності є лінійними для всього діапазону досліджуваних магнітних полів (від 0 до 0,5 Тл). Лише для зразків германію, покритих шаром епоксидної смоли з наповнювачем порошку заліза, спостерігалось незначне відхилення від лінійності таких залежностей при магнітних полях до 0,3 Тл, що пояснюється додатковим намагніченням порошку заліза. Наявність залишкового намагнічення наповнювача порошку заліза та відповідно індуковане додаткове ЕРС Холла може бути використане для розробки на основі опромінених монокристалів n-Ge, покритих шаром епоксидної смоли з наповнювачем порошку заліза, систем акумулювання енергії. Було встановлено, що наявність захисного шару з епоксикомпозиту значно підвищує захист монокристалів германію від дії значних радіаційних та магнітних полів. Це є важливим при конструюванні на основі германію датчиків Холла, що можуть функціонувати в екстремальних умовах дії таких полів.

**Ключові слова:** ефект Холла, епоксидна смола, монокристали германію, магнітна чутливість, залишкове намагнічення, радіаційні дефекти