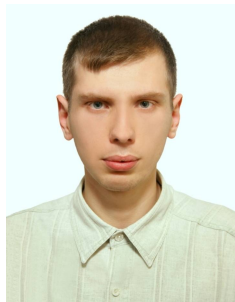


УДК 537



Дзундза Б.С.

Дзундза Б.С. канд. фіз-мат. наук

Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57,
Івано-Франківськ, 76018, Україна,
e-mail: bohdan.dzundza@pu.if.ua

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Описано методику вимірювання коефіцієнта Зеебека, холлівської концентрації носіїв, питомої електропровідності напівпровідникових плівкових термоелектричних матеріалів. Представлена електрична схема та розроблена комп'ютерна програма, що забезпечує автоматизацію вимірювань, реєстрацію і первинною обробку даних, з можливість побудови графіків часових залежностей для попереднього аналізу експериментальних даних вже в процесі вимірювання. Бібл. 6, рис. 6.

Ключові слова: термоелектрика, холлівські вимірювання, автоматизація, мікроконтролер, тонкі плівки.

Вступ

Проблема автоматизації вимірювань коефіцієнта Зеебека, холлівської концентрації носіїв, питомої електропровідності та їх залежностей від температури та магнітного поля для напівпровідникових термоелектричних матеріалів, зокрема сполук типу AIVBVI актуальна завдяки перспективі їх використання для створення термоелектричних перетворювачів енергії [1]. Такі вимірювання вимагають точної стабілізації температур, величини магнітного поля, струму через зразок, прецизійної та дорогої електрометричної техніки, а дослідження термоелектричних параметрів таких зразків є достатньо трудомістким.

В останні десятиліття швидкий розвиток мікропроцесорної та комп'ютерної техніки відкриває нові можливості автоматизації складних технологічних процесів та лабораторних досліджень. Спеціалізовані мікросхеми та мікроконтролери з великою кількістю пам'яті, широко розвиненою периферією та невеликою ціною в поєднанні з простотою освоєння є оптимальними для їх використання в автоматизованих вимірювальних комплексах.

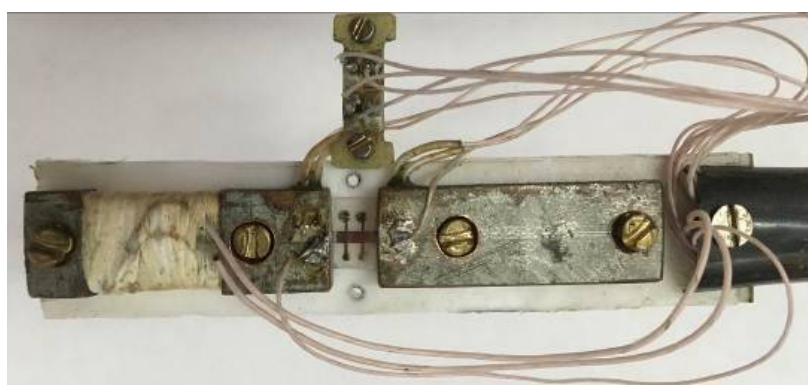
У даній роботі представлена електрична схема та розроблена комп'ютерна програма, що забезпечує автоматизацію вимірювань коефіцієнта Зеебека, питомої електропровідності, та холлівської концентрації носіїв в залежності від температури та магнітних полів для плівкових термоелектричних матеріалів, а також реєстрацію, візуалізацію та первинну обробку отриманих даних.

Методика вимірювання

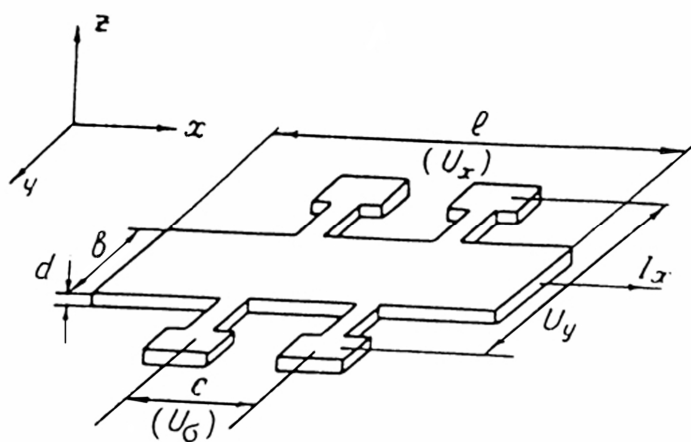
Вимірювання коефіцієнта Зеебека, питомої електропровідності, та холлівської

концентрації проводили у постійних магнітних полях величиною до 2 Тл. При вимірюванні плівкові зразки розташовувалися в тримачі типової конструкції [2] з шістьма вимірювальними зондами (два струмових і чотири холлівських). Виготовлення надійних омичних контактів, які не руйнують плівку і задовольняють всім необхідним вимогам [2, 3], проводилися методами осадження срібла в поєднанні з позолоченими притискними підпружиненими контактами або пайки при $T < 400$ К. Вибір основного контактного матеріалу визначався його роботою виходу, температурними і механічними властивостями. Для припаювання використовувались індій і його сплави з оловом, свинцем, сріблом і сурмою, а як з'єднувальні елементи - срібний і мідний провід діаметром (0.01-0.05) мм. Для забезпечення омичності контактів і покращення адгезії в місцях пайки хімічним способом осаджувалось золото (для плівок p - типу провідності) або мідь (для плівок n - типу). Контроль властивостей виготовлених контактів проводився шляхом аналізу ВАХ зразків [2].

Струмові контакти виконані у вигляді двох масивних мідних пластин, конструкція забезпечувала створення в зразку стабільного градієнта температури величиною (0.3-1.2) К/мм. Інтервал температур у робочій зоні була (77-500) К. Точність вимірювання температур складала 0.1-0.2 К, а магнітних полів ± 3 %. Криостати для створення низьких температур являли собою кварцові посудини Дьюара або посудини із пінопласту, заповнені рідким азотом і розміщені в зазорі магніту. Проміжні температури між азотною і кімнатною досягались підігрівом за допомогою ніхромової спіралі, біфілярно намотаної на трубчастий циліндр який герметично встановлювався на тримача зразка, що дало змогу проводити вимірювання у вакуумі 10^{-4} Па.



а)



б)

Рис. 1. Загальний вигляд вимірювальної комірки (а) та конфігурація зразка (б) для вимірювання електричних параметрів тонких плівок.

Результати усереднювали вимірювання у двох напрямках струму та магнітного поля по

обох парах контактів зразка (рис. 1). Товщину тонких плівок визначали оптичним методом за допомогою мікроінтерферометра МІІ-4. При цьому забезпечувалась точність ~ 0.02 мкм. Тип провідності визначався за знаком термоЕРС. [2].

Схемотехніка установки

Функціональна схема установки наведена на рис. 2. Даний вимірювальний комплекс є вдосконаленою і суттєво переробленою версією раніше розробленої установки описаної автором в [4]. Основою вимірювального комплексу є цифровий мультиметр UNI-T UTM1805A який підтримує вивід даних на комп'ютер і в режимі вольтметра постійної напруги забезпечує роздільну здатність 1 мкВ при точності 0.015 % та має режим автоматичного вибору діапазону вимірювання.

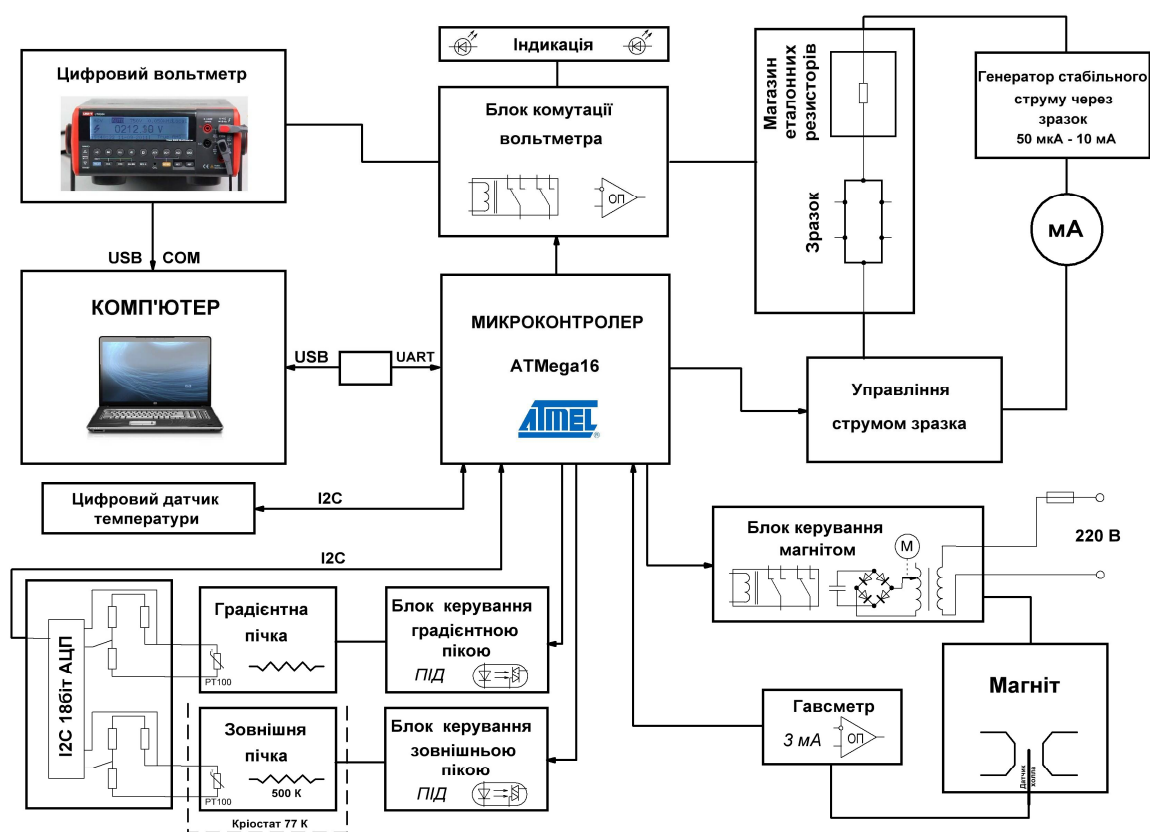


Рис. 2. Функціональна блок-схема установки автоматизованих вимірювань термоелектричних параметрів напівпровідників.

В якості керуючого пристрою вибрано мікроконтролер ATmega16, який характеризується достатньою кількістю пам'яті і добре розвинутою периферією. Використання даного мікроконтролера дало можливість реалізувати поставлену задачу, а також залишилися ресурси для подальшої модернізації та розширення функціоналу. Програма для мікроконтролера написана на С. Зв'язок з комп'ютером на апаратному рівні забезпечується перетворювачем USB-UART, а на програмному за допомогою інтерпретатора текстових команд, що забезпечує двосторонній обмін даними між керуючою програмою на комп'ютері та мікроконтролером установки.

Зняття спаду напруги на зразку, еталонному резисторі, холлівський та струмових парах

контактів здійснюється послідовно за допомогою шести герконових мікрореле блоку комутації. Використання герконових мікрореле забезпечує низький опір контактів у включеному та надзвичайно високий (більше 1 ГОм) у виключеному стані, а також стабільність контактів у часі. Генератор стабільного струму через зразок зібраний на мікросхемі LM234 і має 12 дискретних значень струму які контролюються амперметром. Увімкнення струму та зміна полярності реалізована на електромеханічних реле які управляються мікроконтролером.

Зміна полярності магнітного поля та увімкнення магніту реалізована на електромагнітних контакторах, які гальванічно розв'язані від мікроконтролера за допомогою оптосимісторів. З метою мінімізації електромагнітних завад на всі контактори встановлено іскрогасящі RC ланцюжки. Управління величиною магнітного поля здійснюється плавно за допомогою моторизованого лабораторного автотрансформатора. Управління мотором реалізовано через оптосимістори та реле з метою гальванічної розв'язки від керуючого мікроконтролера. Зворотній зв'язок здійснюється по напрузі через розв'язуючий трансформатор TR3 (рис. 4). У попередній версії була спроба реалізувати плавне керування магнітним полем за допомогою широтно-імпульсної модуляції на силових високовольтних MOS-FET транзисторах, але в зв'язку з великою кількістю електромагнітних завад та нестабільністю роботи на індуктивне навантаження від такої реалізації довелося відмовитися.

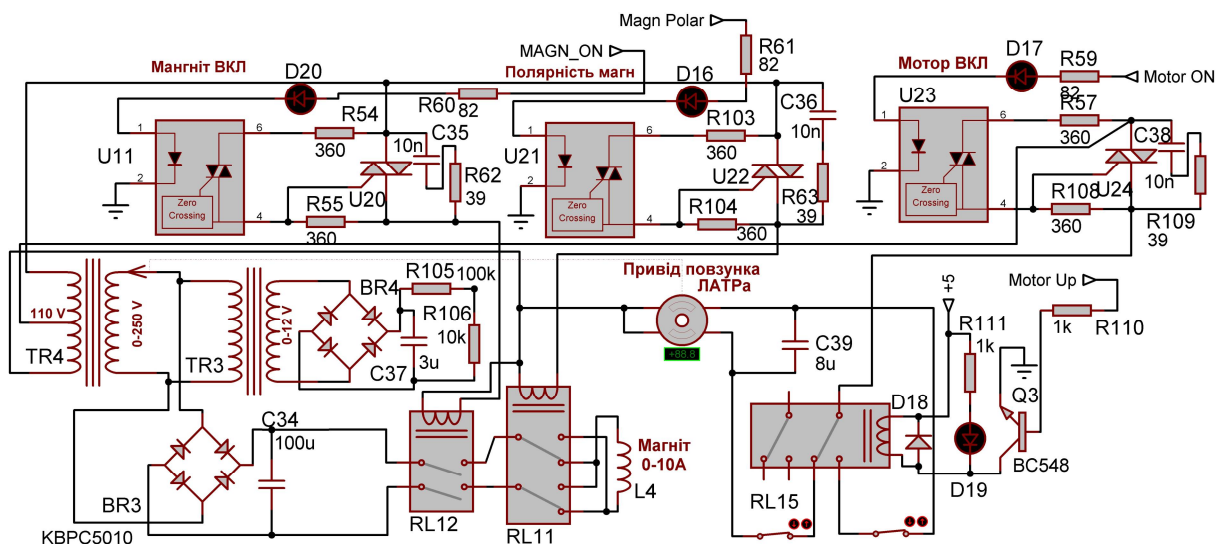


Рис. 3. Електрична принципова схема блоку керування величиною магнітної індукції.

Для вимірювання індукції магнітного поля застосовано датчик Холла (ДХК-0,5А, ПХЭ602117Б) який живиться стабільним струмом 3 мА і розміщується на виносному щупі в робочій зоні магніту (рис. 3). Сигнал з датчика нормується операційним підсилювачем і зчитується аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) мікроконтролера. Калібровка і повірка проводилась за допомогою високоточного гавсметра Ш1-8 в діапазоні (0.05-2.0) Тл з занесенням калібрівочної таблиці в пам'ять мікроконтролера.

Температура вимірюється платиновими терморезисторами PT100 ввімкненим в мостову схему (рис. 4), яка живиться від прецизійного джерела опорної напруги AD1583. В якості резисторів у плечах моста використано 0.1 % SMD резистори з малим ТКО. Напруга розбалансу моста вимірюється дискретним I2C сігма-дельта АЦП MCP3424, розміщеним разом з мостовими схемами і джерела опорної напруги на окремій платі в роз'ємні вимірювальної

комірки. Управління нагрівачами забезпечується симісторним регулятором, з комутацією при переході напруги через нуль та опторозв'язкою. Стабілізація температур здійснюється за допомогою пропорційно інтегрально диференціального (ПІД) алгоритму з рівномірним розподілом періодів згідно алгоритму Брезенхема.

Загальний вигляд установки показано на рис. 5. З метою мінімізації електромагнітних завад функціональні блоки зібрані на окремих друкованих платах які розміщуються в закритих алюмінієвих комірках заземленого корпусу і з'єднуються між собою екранованим проводом, а силову частину (блок управління магнітом і нагрівниками) винесено в окремий корпус (рис. 5).

Програмна реалізація процесу вимірювання

Комп'ютерна програма забезпечує автоматизоване керування процесом вимірювання, реєстрацію даних з цифрового вольтметра, попередню обробку та візуалізацію даних. Написана програма в середовищі Delphi. Дані з вольтметра приймаються і декодуються програмою та відображаються на екрані, а також розраховується і відображається середнє значення по десяти останніх отриманих вимірах. Підтримуються вольтметри UNI-T як з новим протоколом передачі даних (UTM1805A) так і попередні версії (UT804).

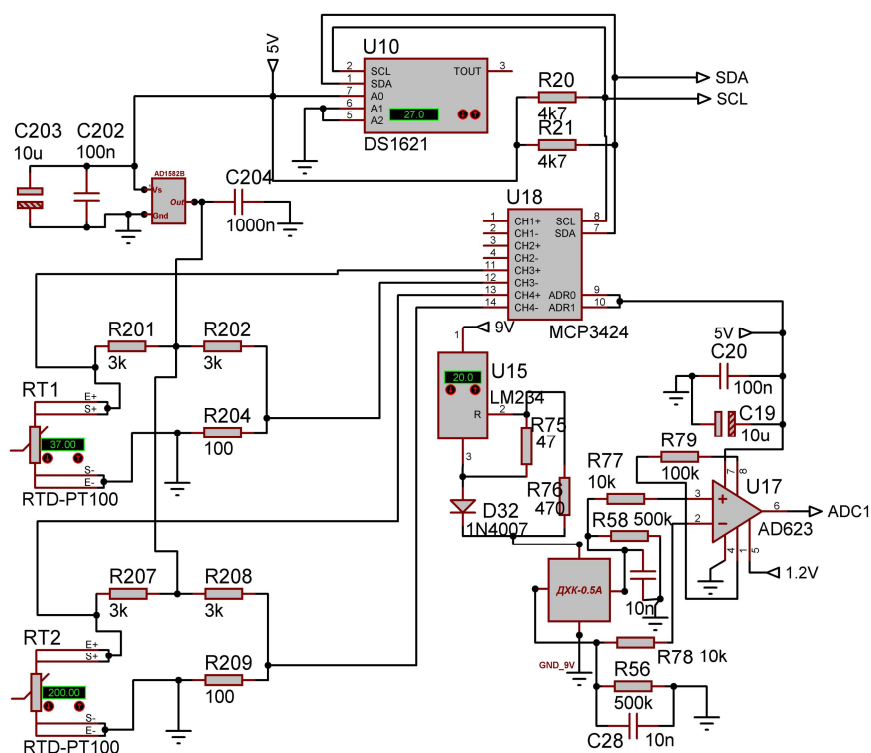


Рис. 4. Електрична принципова схема блоку вимірювання температури та магнітної індукції.

Між контролером і комп'ютером реалізовано двосторонній обмін інформацією через UART (швидкість 9600 біт/с, 8 біт), керування установкою та запит даних здійснюється шляхом відправлення команд та отримання відповіді після їх виконання. Реалізована перевірка правильності команди та повторна відправка в разі помилки. Так як деякі команди виконуються періодично по таймеру з метою уникнення збоїв відслідковується статус очікування результату виконання поточної команди.



Рис. 5. Загальний вигляд установки автоматизованих вимірювань термоелектричних параметрів напівпровідників.

У ручному режимі програма дозволяє управляти окремими функціональними блоками незалежно, що дає можливість проводити налагодження та виконувати нестандартний експеримент з автоматичним чи ручним записом результатів.

В автоматизованому режимі програма дозволяє проводити як одиночні вимірювання електричних параметрів з автоматичним розрахунком коефіцієнта Зеебека, питомої провідності, концентрації та рухливості носіїв, та ін.), так і серії вимірювань від часу, температури чи магнітного поля з побудовою температурно-часової діаграми запланованих вимірювань (рис. 6). У процесі вимірювань можлива візуалізація вибраних параметрів у вигляді графічних залежностей.

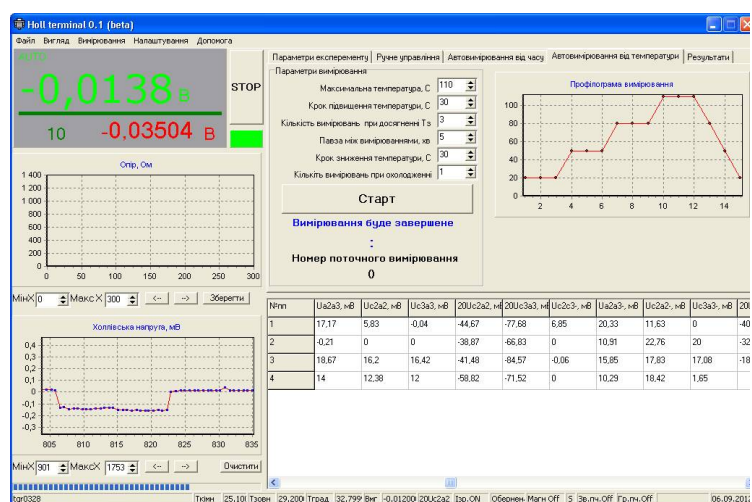


Рис. 6. Загальний вигляд вікна керуючої програми в процесі автоматизованих вимірювань термоелектричних параметрів плівок

Для серії зразків різних товщин реалізується можливість автоматичного фільтрування даних та побудови профілів термоелектричних параметрів. Результати вимірювання кожного зразка зберігаються в окремому MS Excel сумісному файлі з можливістю подальшого продовження експерименту.

Для оцінки похибок проводили вимірювання зразків різного типу провідності з відомими параметрами. Максимальна похибка визначення σ не перевищувала 3 %, RH – 5 %, а величини α – 10 %. Результати досліджень термоелектричних напівпровідникових плівки отриманих на

даному вимірювальному комплексу представлено у роботах [4 – 6]. При тривалій регулярній експлуатації установка показала високу надійність і стабільність результатів.

Висновки

1. Розроблена електрична схема, та сконструйована діюча установка вимірювання коефіцієнта Зеебека, холлівської концентрації носіїв, питомої електропровідності напівпровідникових плівкових термоелектричних матеріалів.
2. Створена комп'ютерна програма що забезпечує автоматизацію вимірювань, реєстрацією і первинною обробку даних, з можливістю їх візуалізації графічних залежностей.

Література

1. Шперун В.М., Фреїк Д.М., Запухляк Р.І. Термоелектрика телуриду свинцю та його аналогів. Івано-Франківськ, Плай, 2000, 250 с.
2. Кучис Е.В. Методы исследования эффекта Холла. Москва, Советское радио, 1974, 328 с.
3. Ковтонюк Н.Ф.. Измерение параметров полупроводниковых материалов. Москва, Металлургия, 1970, 429 с.
4. Saliy Y.P., Dzundza B.S., Bylina I.S., Kostyuk O.B. The influence of the technological factors of obtaining on the surface morphology and electrical properties of the PbTe films doped Bi // Journal of Nano- and Electronic Physics, Vol 8, N 2, 2016, P. 02045-02051.
5. Дзундза Б.С., Костюк О.Б., Маковишин В.І., Перегінчук М.Ю. Термоелектричні властивості тонких плівок на основі чистого і легованого плюмбум телуриду // Термоелектрика №6, 2016. С. 55-61.
6. Ruvinskii M.A., Kostyuk O.B., Dzundza B.S., Yaremiy I.P., Mokhnatskyi M.L., Yavorskyu Ya.S. Kinetic phenomena and thermoelectric properties of polycrystalline thin films based on PbSnAgTe compounds // Journal of Nano - and Electronic Physics, Vol. 9, N 5, 2017, P. 05004-1 – 05004-6.

Надійшла в редакцію 04.10.2018

Дзундза Б.С., канд. физ.-мат. наук

Прикарпатский национальный университет
имени Василия Стефаника,
ул. Шевченко, 57, Ивано-Франковск, 76018, Украина,
e-mail: bohdan.dzundza@pu.if.ua.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Описана методика измерения коэффициента Зеебека, холловской концентрации носителей, удельной электропроводности полупроводниковых пленочных термоэлектрических

материалов. Представлена электрическая схема и разработана компьютерная программа, которая обеспечивает автоматизацию измерений, регистрацию и первичную обработку данных, с возможностью построения графиков временных зависимостей для предварительного анализа экспериментальных данных уже в процессе измерения. Библ. 6, рис. 6.

Ключевые слова: термоэлектричество, холловские измерения, автоматизация, микроконтроллер, тонкие пленки.

B.S. Dzundza *cand. phys. - math. sciences*

Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine,
e-mail: bohdan.dzundza@pu.if.ua

AUTOMATED HARDWARE-SOFTWARE SYSTEM FOR MEASUREMENT OF THERMOELECTRIC PARAMETERS OF SEMICONDUCTOR MATERIALS

A method of measuring Seebeck coefficient, Hall concentration of current carriers, electrical conductivity of semiconductor films has been described. An electric circuit has been presented and a computer program, which enables automation of measurement, registration and initial processing of data with the possibility of charting time dependences for preliminary analysis of experimental data in the process of measurement, has been developed. Fig. 6, Bibl. 6.

Keywords: thermoelectricity, hall measurements, automation, microcontroller, thin films.

References

1. Shperun V.M., Freik D.M., Zapukhliak R.I.. Termoelektryka telurydu svyntsiu ta yoho analohiv. Ivano-Frankivsk, Plaj, 2000, 250 s.
2. Kuchys E.V. Методы yssledovaniya эффеkта Kholla. Moskva, Sovetskoe radyo, 1974, 328 s.
3. Kovtoniuk N.F.. Yzmerenye parametrov poluprovodnykovykh materyalov. Moskva, Metallurhyia, 1970, 429 s.
4. Saliy Y.P., Dzundza B.S., Bylina I.S., Kostyuk O.B. The influence of the technological factors of obtaining on the surface morphology and electrical properties of the PbTe films doped Bi// Journal of Nano- and Electronic Physics, Vol 8, N 2, 2016, P. 02045-02051.
5. Dzundza B.S., Kostiuk O.B., Makovyshyn V.I., Perehinchuk M.Iu. Termoelektrychni vlastyvoli tonkykh plivok na osnovi chystoho i lehovanoho pliumbum telurydu // Termoelektryka №6, 2016. S. 55-61.
6. Ruvinskii M.A., Kostyuk O.B., Dzundza B.S., Yaremiy I.P., Mokhnatskyi M.L., Yavorskyu Ya.S. Kinetic phenomena and thermoelectric properties of polycrystalline thin films based on PbSnAgTe compounds // Journal of Nano - and Electronic Physics, Vol. 9, N 5, 2017, P. 05004-1 – 05004-6.

Submitted 04.10.2018