УДК 621.315.592

АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКІВ

М. О. Галущак[1)], Б. С. Дзундза[2)], А. І. Ткачук[1,2)], Д. М. Фреїк[2)]

1)–Івано–Франківський національний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано–Франківськ, 76019, e–mail: andrij.tkachyk@gmail.com

2)–Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника, вул. Шевченка, 57, Івано–Франківськ, 76000, Україна, т. 0342596082, e–mail: freik@pu.if.ua

Описано методику вимірювання електричних параметрів (тип провідності, питома електропровідність, коефіцієнт Холла, концентрація носіїв заряду, рухливість, коефіцієнт термо–е.р.с.) напівпровідників. Представлена електрична схема та розроблена комп'ютерна програма, що забезпечує автоматизацію вимірювань, реєстрацією і первинну обробку даних, можливість побудови графіків часових залежностей для попереднього аналізу експериментальних даних вже в процесі вимірювання. Максимальна похибка визначення питомої електропровідності не перевищує 3 %, коефіцієнта Холла – 5 %, а коефіцієнта термо–е.р.с. – 15 %.
Ключові слова: електричний параметр, напівпровідник, автоматизація, мікроконтролер, установка.

Описана методика измерения электрических параметров (тип проводимости, удельная электропроводность, коэффициент Холла, концентрация носителей заряда, подвижность, коэффициент термо–э.д.с.) полупроводников. Представленная электрическая схема и разработана компьютерная программа, обеспечивающая автоматизацию измерений, регистрации и первичной обработки данных, с возможность построения графиков временных зависимостей для предварительного анализа экспериментальных данных уже в процессе измерения. Максимальная погрешность определения удельной электропроводимости не превышает 3%, коэффициента Холла – 5%, а коэффициента термо–э.д.с. – 15%.
Ключевые слова: электрический параметр, полупроводник, автоматизация, микроконтроллер, установка.

The method of measuring of electrical parameters (conductivity type, electrical conductivity, Hall coefficient, carrier concentration, mobility, the Seebeck coefficient) of semiconductors has been described. The electrical circuit has been submitted and a computer program has been developed that provides automation of measurement, registration and initial processing of the data with the possibility of charting time dependences for the preliminary analysis of the experimental data which are in the process of measurement. The maximum error of electrical conductivity does not exceed 3%, Hall coefficient – 5%, and Seebeck coefficient – 15%.
Keywords: electrical parameter, semiconductor, automation, microcontroller, installation.

Вступ

Швидкий розвиток мікропроцесорної та комп'ютерної техніки відкриває нові можливості автоматизації технологічних процесів, а нові мікроконтролери з великим об'ємом пам'яті, розвиненою периферією і порівняно невеликою ціною у поєднанні з простотою освоєння роблять оптимальним їх використання в автоматизованих вимірювальних комплексах.

На даний час розроблено достатньо методів вимірювання електричних параметрів напівпровідників, зокрема методи постійного струму і постійних магнітних полів, одно– та багаточастотні методи, метод Ван–дер–Пав та струму Холла, ємкісні та індукційні безконтактні методи [1÷3]. Але всі ці методи дослідження електричних параметрів напівпровідників є досить трудомісткі і потребують автоматизації як самого процесу

вимірювання, так і програмної обробки отриманих результатів [4].

У даній роботі представлена електрична схема та розроблена комп'ютерна програма, що забезпечує автоматизацію вимірювань електричних параметрів напівпровідникових плівок, реєстрацією і первинну обробку отриманих даних.

Методика вимірювання Вимірювання електричних параметрів напівпровідникових плівок – тип провідності, питома електропровідність σ, холлівська концентрація носіїв заряду *n*, рухливість μ, коефіцієнт термо–е.р.с. α – проводили у постійних електричних і магнітних полях величиною (0,1÷2) Тл. При вимірюванні плівкові зразки розташовувалися у тримачі типової конструкції [1] з шістьма вимірювальними зондами (два струмових і чотири холлівських), двома термопарами (хромель–алюмель або мідь–константан), внутрішнім (градієнтним) і зовнішнім нагрівачами (рис. 1). Конструкція забезпечувала створення у зразку стабільного градієнта температури величиною (0,3÷1,2) К/мм. Інтервал температур у робочій зоні складає (77÷500) К, а точність її вимірювання – (0,5÷1,0) К. Кріостати 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 електроспіралі, біфілярно намотаної на трубчасте осердя тримача зразка. Геометрія комірки дозволяла проводити вимірювання у вакуумі (10^{-3}÷10^{-4}) Па. Виготовлення надійних омічних контактів, які не руйнують плівку і задовольняють вимогам омічності [1, 2], проводили методами осадження і вакуумі плівок срібла в поєднанні з позолоченими притискними контактами, або пайки при T<400 К. Вибір основного контактного матеріалу визначався його роботою виходу, температурними і механічними властивостями. Для припаювання використовували 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 омічності 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 вольт – амперної характеристики (ВАХ) зразків [1]. Тип провідності визначався за знаком термо–е.р.с. [1]. Результати усереднювали вимірюванням у двох напрямках струму та магнітного поля із обох пар контактів зразка (рис. 1).

Товщину тонких плівок визначали оптичним методом за допомогою мікроінтерферометра МІІ–4. При цьому забезпечувалась точність ~ 0,02 мкм.

Розрахунок основних електричних параметрів проводили (у відповідності з рис. 1) згідно таких виразів [1]:

$$;\sigma=\frac{c}{bd}\frac{1}{V_x}, \qquad (1)$$

$$R_H = d\frac{V_y}{I_x}\frac{1}{B_z}, \qquad (2)$$

$$\mu=\frac{cV_y}{bV_\sigma}\frac{1}{B_z}, \qquad (3)$$

$$\alpha=\frac{V_x}{\Delta T_x}, \qquad (4)$$

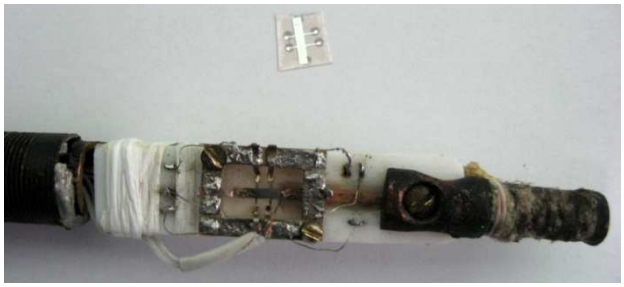
де σ – питома електропровідність, R_H, – коефіцієнт Холла, α – термо–е.р.с., $\mu_н$ – холлівська рухливість.

Максимальна похибка визначення σ не перевищувала 3 %, R_H – 5 %, а величини α – 15 %.

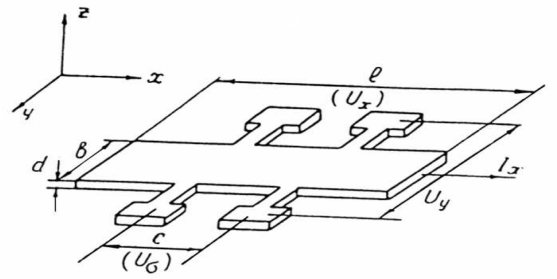
Масивні зразки мали циліндричні форму і їх досліджували за аналогічною методикою [1]. У якості товщини d використовували ефективну товщину $d_{еф}$ [1], яка для циліндричного зразка дорівнює $d_{еф}=S/h$, де S – площа поперечного перерізу зразка, h – висота. Тоді R_H визначався так:

$$R_H = d_{еф}\frac{V_y}{I_x}\frac{1}{B_z}. \qquad (5)$$

Схемотехніка установки. Функціональна схема установки наведена на рис. 2. Основою вимірювального комплексу є цифровий мультиметр UNI–T UT804, який підтримує вивід даних на комп'ютер і в режимі вольтметра постійної напруги забезпечує роздільну здатність 0,01 мВ з похибкою 0,05 % та має режим автоматичного вибору діапазону вимірювання.



а)



б)

Рисунок 1 – Загальний вигляд вимірювальної комірки (*а*) та конфігурація зразка (*б*) для вимірювання електричних параметрів тонких плівок

У якості керуючого пристрою вибрано мікроконтролер ATMega16, який характеризується широко розвиненою периферією. Зокрема, має вбудований UART для зв'язку з комп'ютером, 8–канальний аналогово–цифровий перетворювач (АЦП) для оцифровки аналогових сигналів термопар, компаратор, достатню кількість пам'яті та виводів. Використання даного мікроконтролера дало можливість не тільки реалізувати поставлену задачу, але й залишити ресурс для подальшої модернізації та розширення функціональних можливостей.

Програма для мікроконтролера написана на мові С в середовищі CodeWizardAVR.

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.

Комутація вольтметра і зняття спаду напруги на еталонному резисторі, зразку, струмових та холлівський парах контактів здійснюється послідовно за допомогою шести герконових мікрореле блоку комутації. Ще чотири мікрорелле дозволяють підключити холлівські пари контактів до вольтметра через інструментальний підсилювач, який забезпечує підсилення холлівської напруги в 20 разів (рис. 5) та вхідний опір більше 1 ГОм. Використання герконових мікрореле забезпечує низький опір контактів у включеному та надзвичайно високий (більше 1 ГОм) у виключеному станах, а також стабільність контактів у часі.

Генератор стабільного струму через зразок зібраний на мікросхемі LM234 і має 12 дискретних значень струму, які вибираються за допомогою галетного перемикача і контролюються амперметром. Увімкнення струму та зміна полярності реалізована на електромеханічних реле, які керуються мікроконтролером.

Увімкнення магніту та зміна полярності магнітного поля також реалізована на електромеханічних реле, струм через магніт задається лабораторним автотрансформатором, який включений перед випрямним мостом. Плавне регулювання струму через магніт здійснюється за допомогою реверсного електродвигуна, який переміщує повзунок лабораторного автотрансформатора, зворотний зв'язок по напрузі реалізовано за допомогою АЦП мікроконтролера з використанням розв'язуючого трансформатора. Така схема дає можливість вимірювати магнітоопір в автоматизованому режимі. Вимірювання індукції магнітного поля реалізовано на давачу Холла (ПХЭ602117Б, ДХК–0,5А), який розміщується на виносному щупі у робочій зоні магніту та живиться стабільним струмом 3 мА. Сигнал з давача через інструментальний підсилювач заведений на АЦП мікроконтролера. Первинна калібровка і повірка проводилися за допомогою високоточного гавсметра Ш1–8 в діапазоні (0,05÷2,0) Тл із занесенням калібровочної таблиці в пам'ять міроконтролера.

Аналогічно оцифровуються сигнали термопар, які попередньо підсилені інструментальними підсилювачами та зміщені на середину робочого діапазону АЦП для можливості вимірювання температур нижче 0 ^{o}C. Температура холодних кінців термопар вимірюється цифровим давачем DS18B20 і компенсується програмно.

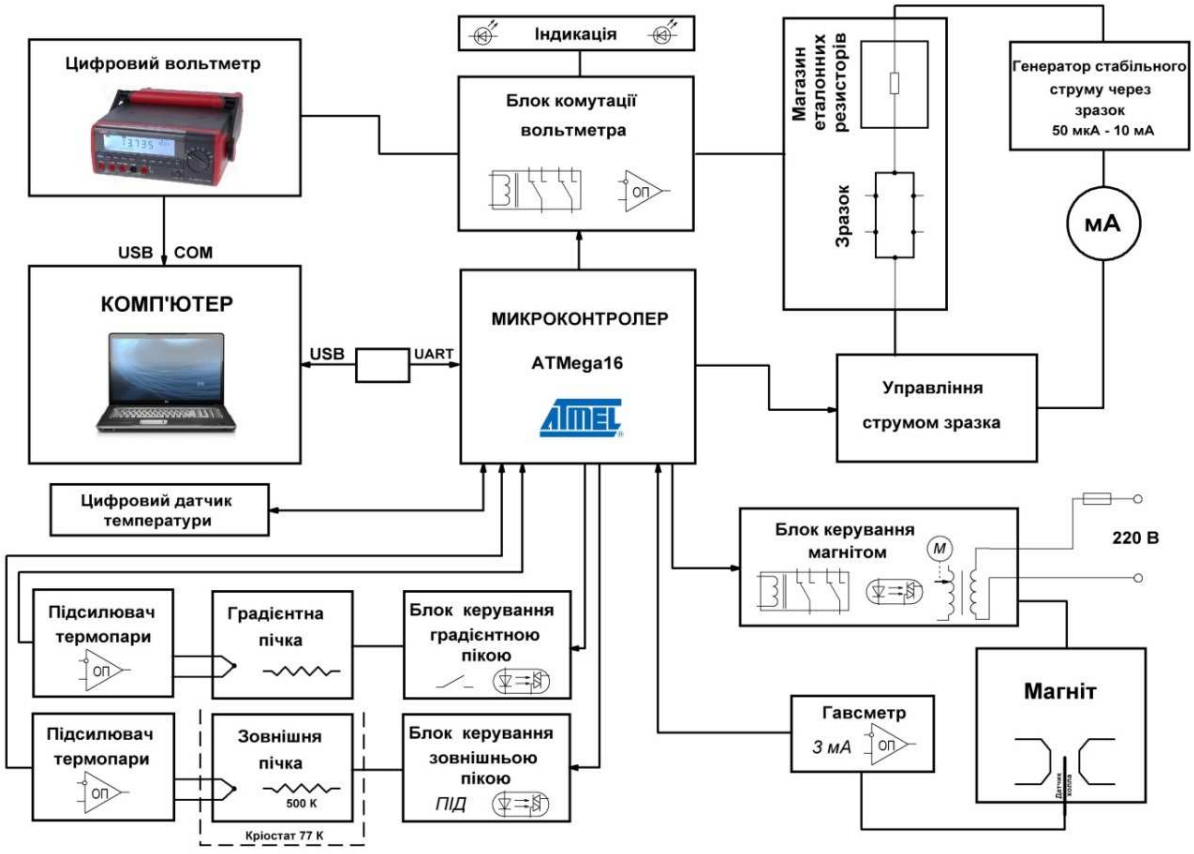


Рисунок 2 – Функціональна схема установки автоматизованих вимірювань електричних параметрів напівпровідників

Управління нагрівачами забезпечується симісторним регулятором з комутацією при переході напруги через нуль та опторозв'язкою. Стабілізація температури зовнішньої пічки здійснюється за допомогою ПІД – алгоритму, а градієнтної – методом релейного управління.

Загальний вигляд установки показано на рис. 3. Функціональні блоки зібрані на окремих друкованих платах, які розміщуються в закритих алюмінієвих комірках заземленого корпусу і з'єднуються між собою екранованим проводом з метою мінімізації електромагнітних перешкод. З тією ж метою мережеві трансформатори закриті металевою кришкою, а силову частину (блок управління магнітом і нагрівниками) винесено в окремий корпус (рис. 4).

Програмна реалізація процесу вимірювання. Програма написана в середовищі Delphi і забезпечує реєстрацію даних з цифрового вольтметра, ручне та автоматизоване керування процесом вимірювань, попередню обробку та візуалізацію даних.

Цифровий вольтметр передає результати вимірів у реальному часі три рази в секунду по протоколу RS232 (швидкість 2400 біт/с). Дані приймаються і декодуються програмою та відображаються на екрані, а також розраховується і відображається середнє значення по десяти останніх отриманих вимірах.

Між контролером і комп'ютером реалізовано двосторонній обмін інформацією через UART (швидкість 2400 біт/с). Керування установкою та запит даних здійснюється шляхом відправлення команд та отримання відповіді після їх виконання.

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



Рисунок 3 – Загальний вигляд установки автоматизованих вимірювань електричних параметрів напівпровідників



Рисунок 4 – Компоновка функціональних блоків установки автоматизованих вимірювань електричних параметрів напівпровідників

В автоматизованому режимі програма дозволяє проводити як одиночні вимірювання електричних параметрів (а після внесення даних про геометричні розміри зразка з автоматичним розрахунком питомої провідності, концентрації та рухливості носіїв, коефіцієнта термо–е.р.с. та ін.), так і серії вимірювань в залежності від часу чи температури з побудовою температурно – часової діаграми результатів вимірювань (рис. 5). У процесі вимірювань можлива візуалізація на графіках часових або температурних залежностей вибраних параметрів.

Результати вимірювання кожного зразка зберігаються в окремому файлі з можливістю подальшого продовження експерименту. Реалізована можливість вибору конкретних даних для експорту в MS Exel з метою їх подальшої обробки.

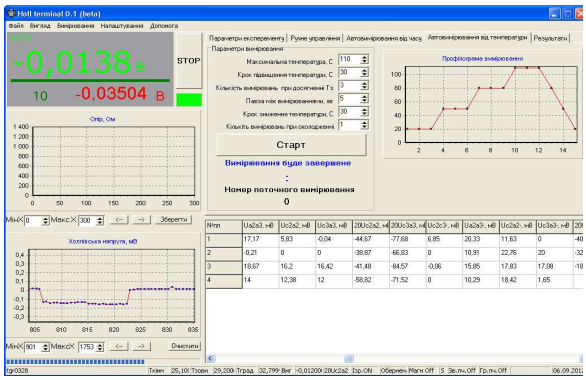


Рисунок 5 – Загальний вигляд вікна керуючої програми установки автоматизованих вимірювань електричних параметрів напівпровідників

Для серії зразків різних товщин тонких плівок реалізується можливість автоматичного фільтрування даних та побудови профілів термоелектричних параметрів.

ВИСНОВКИ

Розроблена електрична схема та сконструйована діюча установка автоматизованого вимірювання електричних параметрів напівпровідникових тонких плівок та масивних зразків. Створена комп'ютерна програма, що забезпечує автоматизацію вимірювань електричних параметрів, реєстрацією і первинну обробку даних з можливістю побудови графіків їх часових та температурних залежностей.

1. Кучис Е.В. Методы исследования эффекта Холла / Евгений Вітольдович Кучис. – М.: Советское радио, 1974. – 328 с. 2. Ковтонюк Н.Ф. Измерение параметров полупроводниковых материалов / Ковтонюк Н.Ф., Концевой Ю.А. – М.: Металлургия, 1970. – 429 с. 3. Коньков В.Л., Павлов Н.И. Эффект Холла в полупроводниках в неоднородном магнитном поле. // Известия ВУЗов. Физика. – 1969. – N12. – С. 121 – 123. 4. Фреїк Д.М., Дзундза Б.С., Ткачук А.І., Кушнір Т.П. Автоматизація вимірювань електричних параметрів напівпровідникових плівок // Фізика і хімія твердого тіла – 2012. – Т. 13, №3. – С. 816–820.

Поступила в редакцію 12.06.2013р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Карпаш О. М.