

Д.М. Фреїк, Б.С. Дзундза, А.І. Ткачук, Т.П. Кушнір

## Автоматизація вимірювань електричних параметрів напівпровідникових плівок

*Фізико-хімічний інститут Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника,  
вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76000, Україна, E-mail: [freik@pu.if.ua](mailto:freik@pu.if.ua)*

Описано методику вимірювання електричних параметрів напівпровідникових плівок. Представлена електрична схема та розроблена комп'ютерна програма, що забезпечує автоматизацію вимірювань, реєстрацію і первинну обробку даних, з можливістю побудови графіків часових залежностей для попереднього аналізу експериментальних даних вже в процесі вимірювання.

**Ключові слова:** електричні параметри, холлівські вимірювання, автоматизація, мікроконтроль.

*Стаття постуила до редакції 11.03.2012; прийнята до друку 15.06.2012.*

### Вступ

Останні десятиліття відбувається швидкій розвиток мікропроцесорної та комп'ютерної техніки, що відкриває нові можливості автоматизації технологічних процесів та лабораторних досліджень. Поява нових мікроконтролерів з великою кількістю пам'яті, широко розвиненою периферією та невеликою ціною в поєднанні з простотою освоєння робить оптимальним їх використання в автоматизованих вимірювальних комплексах.

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

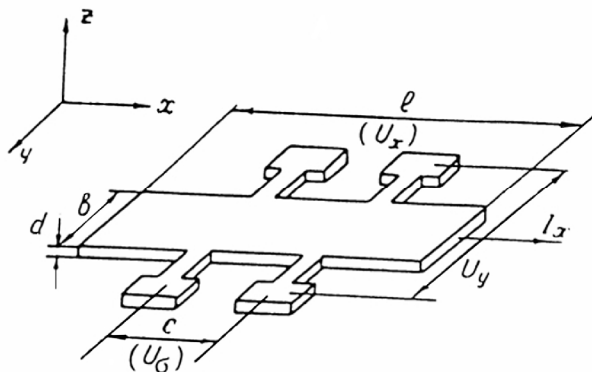
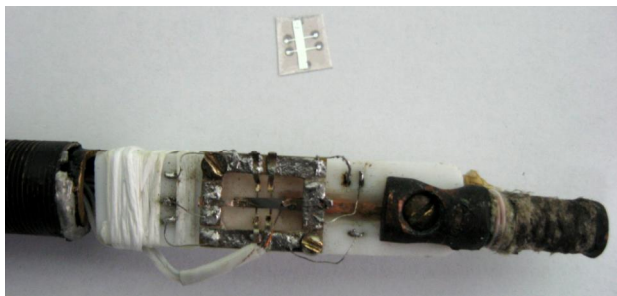
### I. Методика вимірювання

Вимірювання електричних параметрів напівпровідникових плівок – тип провідності, питомий електричний опір, концентрація носіїв заряду, рухливість, коефіцієнт термо-е.р.с. – проводили у постійних магнітних полях величиною (1,5-2) Тл. При вимірюванні плівкові зразки розташовувалися в 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 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 0,5-1,0 К, а магнітних полів  $\pm 3\%$ . 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. Використання герметичної комірки дозволяє проводити вимірювання у вакуумі ( $10^{-3}$ - $10^{-4}$ ) Па.

Виготовлення надійних омичних контактів, які не руйнують плівку і задовольняють всім необхідним вимогам [1,2], проводилися методами осадження 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 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 р-типу провідності) або мідь (для плівок n-типу). Контроль властивостей виготовлених контактів проводився шляхом аналізу ВАХ зразків [1]. Тип провідності визначався за знаком термо-е.р.с. [1]. 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 МП-4. При цьому забезпечувалась точність  $\sim 0,02$  мкм.



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

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

$$\sigma = \frac{c}{bd} \frac{I}{V_x}; \quad R_H = d \frac{V_y}{I_x} \frac{1}{B_z};$$

$$\mu = \frac{c}{b} \frac{V_y}{V_\sigma} \frac{1}{B_z}; \quad \alpha = \frac{V_x}{\Delta T_x},$$

де  $\sigma$  – питома електропровідність;  $R_H$  – коефіцієнт Холла,  $\alpha$  – термо-е.р.с.;  $\mu_H$  – холлівська рухливість.

Максимальна похибка визначення  $\sigma$  не перевищувала 3 %,  $R_H$  – 5 %, а величини  $\alpha$  – 15 %.

## II. 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 при точності 0,05 % та має режим автоматичного вибору діапазону вимірювання.

В якості керуючого пристрою вибрано мікроконтролер ATmega16, якій характеризується широко розвинутою 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 функціоналу.

Програма для мікроконтролера написана на 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 мікрореле 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 геконових 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 вибираються за допомогою галетного переключача і контролюються амперметром. Увімкнення струму та зміна полярності реалізована на електромеханічних реле які управляються мікроконтролером (рис. 3).

Увімкнення магніту та зміна полярності магнітного поля також реалізована на електромеханічних реле, струм через магніт задається лабораторним автотрансформатором які включений перед випрямним мостом (рис. 3). Плавне збільшення струму через магніт до номінального при включенні та плавне зменшення до нуля при виключенні здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Вимірювання індукції магнітного поля реалізовано на датчику холла (ДХК-0,5А, ПХЭ602117Б) який розміщується на виносному щупі в робочій зоні магніту, та живиться стабільним струмом 3 мА. Сигнал з датчика через інструментальний підсилювач заведений на АЦП мікроконтролера. Первинна калібрівка і повірка проводилась за допомогою високоточного гавсметра Ш1-8 в діапазоні (0,05-2,0) Тл з занесенням калібрівочної таблиці в пам'ять мікроконтролера.

Аналогічно оцифровуються сигнали термопар попередньо підсилені інструментальними підсилювачами та зміщені на середину робочого діапазону АЦП для можливості вимірювання температур нижче 0 °С. Температура холодних кінців термопар вимірюється цифровим датчиком DS18B20 і компенсується програмно.

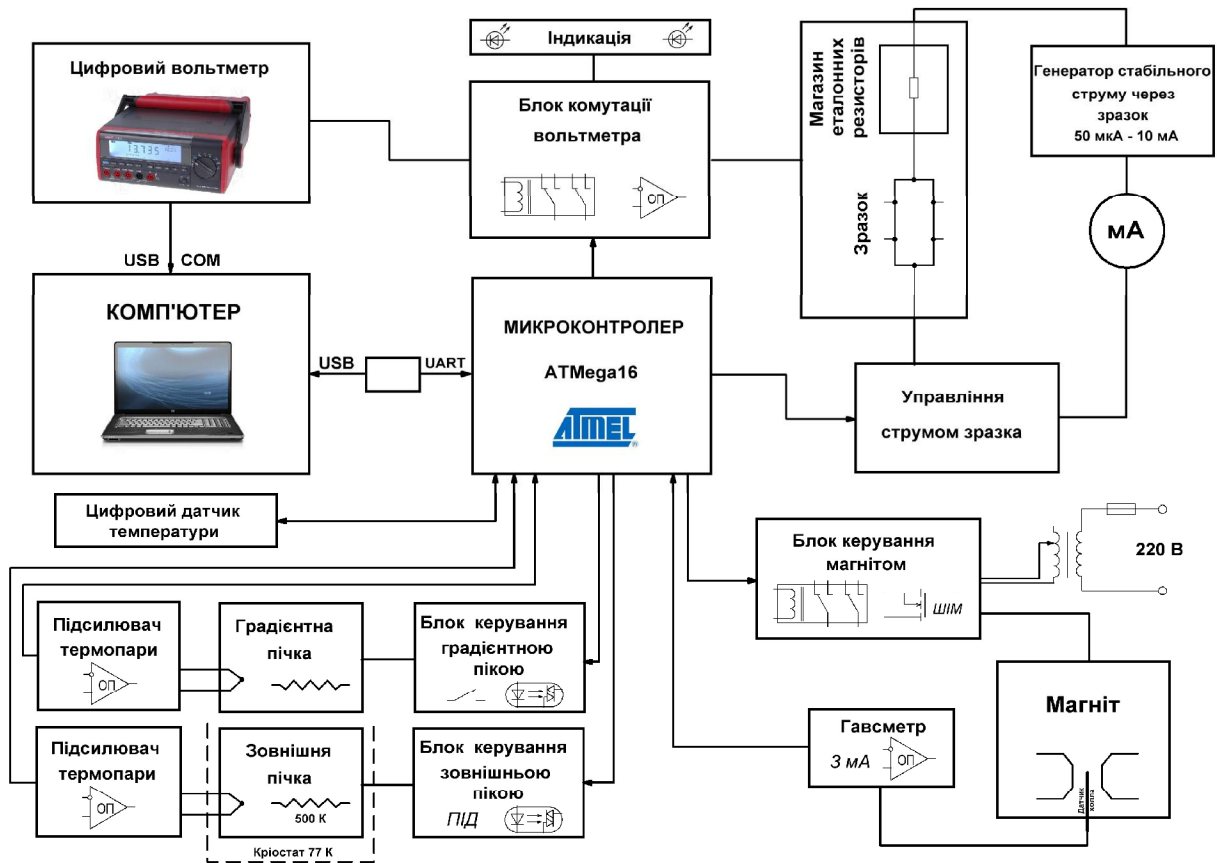


Рис. 2. Функціональна блок-схема установки автоматизованих вимірювань електричних параметрів напівпровідникових плівок.

Управління нагрівачами забезпечується симісторним регулятором, з комутацією при переході напруги через нуль та опторозв'язкою (рис. 3). Стабілізація температури зовнішньої пічки здійснюється за допомогою пропорційного (ПД) алгоритму, а градієнтної методом релейного управління.

Загальний вигляд установки показано на рис. 4. 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. 5).

### III. 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

в реальному часі, три рази в секунду, по протоколу RS232 (швидкість 2400 біт/с, 7 біт). 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 9600 біт/с, 8 біт), керування установкою та запит даних здійснюється шляхом відправлення команд та отримання відповіді після їх виконання.

Крім того, 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 (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 від часу чи температури з побудовою температурно-часової діаграми запланованих вимірювань (рис. 6). У процесі вимірювань можлива візуалізація на графіках часових або температурних залежностей вибраних параметрів.

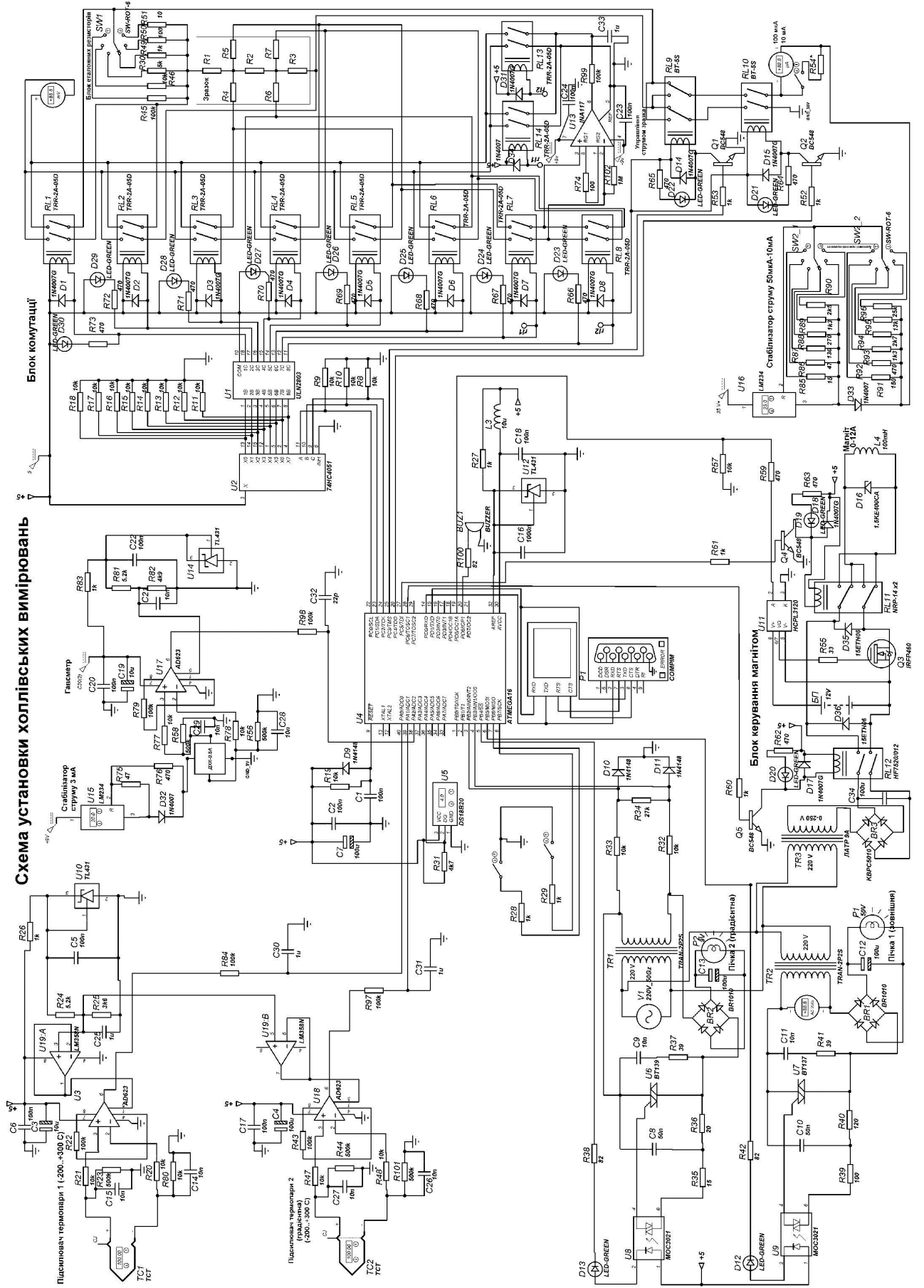


Рис. 5. Електрична схема установки автоматизованих вимірювань електричних параметрів напівпровідникових плівок.





Рис. 4. Загальний вигляд установки автоматизованих вимірювань електричних параметрів напівпровідникових плівок.

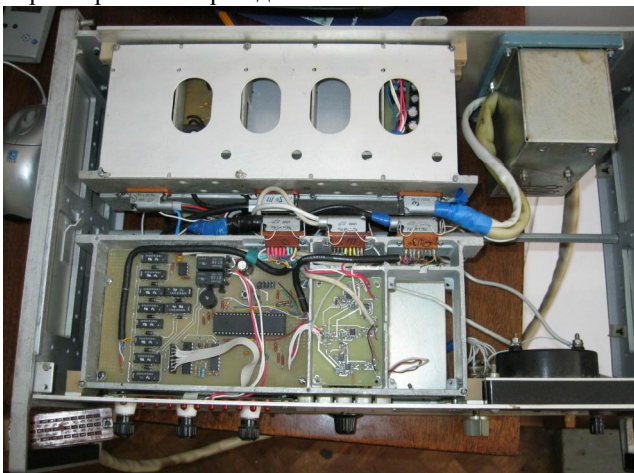


Рис. 5. Компонівка функціональних блоків установки автоматизованих вимірювань електричних параметрів напівпровідникових плівок.

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

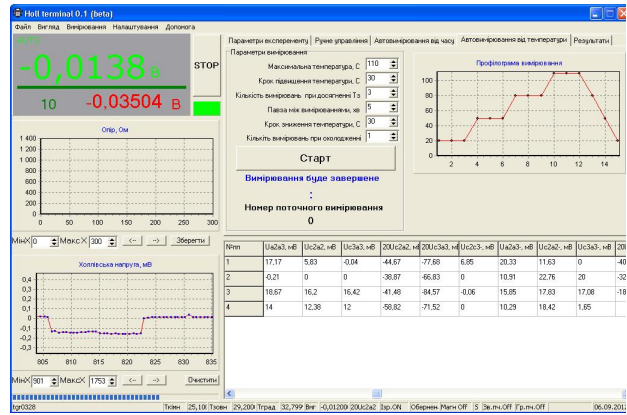


Рис. 6. Загальний вигляд вікна керуючої програми установки автоматизованих вимірювань електричних параметрів напівпровідникових плівок.

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

## Висновки

1. Розроблена електрична схема, та сконструйована діюча установка вимірювання електричних параметрів напівпровідникових плівок.
2. Створена комп'ютерна програма що забезпечує автоматизацію вимірювань, реєстрацію і первинною обробку даних, з можливістю побудови графіків часових та температурних залежностей.

*Робота частково виконана у рамках наукових проектів ДФФД України (державний реєстраційний номер 0112U003693) та МОН України (державний реєстраційний номера 0110U006281).*

**Фреїк Д.М.** – заслужений діяч науки і техніки України, доктор хімічних наук, професор, директор Фізико-хімічного інституту, завідувач кафедри;  
**Дзундза Б.С.** – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник;  
**Ткачук А.І.** – аспірант;  
**Кушнір Т.П.** – студент.

- [1] Е.В. Кучис *Методы исследования эффекта Холла* / Евгений Вітольдович Кучис. Советское радио, М. 328 с. (1974).  
 [2] Н.Ф. Ковтонюк. *Измерение параметров полупроводниковых материалов* / Н.Ф. Ковтонюк, Ю.А. Концевой. Металлургия, М. 429 с. (1970).

D.M. Freik, B.S. Dzundza, A.I. Tkachuk, T.P. Kushnir

## Measurements Automation of Electrical Parameters Semiconductor

Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University  
 57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine, E-mail: [freik@pu.if.ua](mailto:freik@pu.if.ua)

Method for measuring electrical parameters of semiconductor films. Presented electrical circuit and developed a computer program that enables automation of measurement, registration and initial data processing, with the possibility of charting time dependencies for a preliminary analysis of the experimental data already in the process of measurement.