

Б.С. Дзундза, В.В. Прокопів, Т.М. Мазур, Л.Д. Юрчишин

Автоматизація вимірювань фотоелектричних параметрів високоімпедансних напівпровідникових плівок

Фізико-хімічний інститут ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника», вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76000, Україна, e-mail: prkvv@i.ua

Описано методику вимірювання електропровідності та фотопровідності напівпровідникових плівок з високим електричним опором. 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, фотопровідність, автоматизація, мікроконтролер.

Стаття постуила до редакції 11.09.2018; прийнята до друку 15.12.2018.

Вступ

Проблема вимірювань електричних та фотоелектричних параметрів напівпровідникових матеріалів, зокрема сполук типу A^IVB^VI актуальна завдяки перспективі їх використання для створення детекторів гамма та жорсткого рентгенівського випромінювання та як ІЧ-фільтри [1]. Тонкі плівки CdTe використовуються для виготовлення сонячних панелей [2]. Останнім часом також зростає інтерес до квантових точок на основі CdTe.

Типові значення питомого опору даних матеріалі складають 10^8 - 10^9 Ом см [3], і дослідження електричних параметрів таких зразків вимагає прецизійної та дорогої електрометричної техніки та є достатньо трудомістким.

В останні десятиліття відбувається швидкій розвиток мікропроцесорної та комп'ютерної техніки, що відкриває нові можливості автоматизації технологічних процесів та лабораторних досліджень. Поява нових спеціалізованих мікросхем та мікроконтролерів з великою кількістю пам'яті, широко розвинутою 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 електропровідності, фотопровідності та вольт-амперних характеристик напівпровідникових плівок з електричним опором до 500 ГОм, реєстрацію і первинну обробку отриманих даних.

I. Методика вимірювання

Вимірювання електричних параметрів напівпровідникових плівок здійснюється за класичною методикою коли до зразка прикладається достатньо висока напруга і вимірюється струм який протікає через зразок. При вимірюванні плівкові зразки розташовувалися в тримачі типової конструкції [4] виконаному на фторопластовій основі з чотирма вимірювальними зондами та вбудованим еталонним резистором для вимірювання струму цифровим мікрвольтметром. Тримач через рознімне з'єднання закріплюється в середині алюмінієвого циліндра у якому вмонтовані прецизійний давач температури та цифровий вимірювач освітленості, а також джерело світла відповідної частоти. Інтервал температур у робочій зоні 77 - 500 К. Точність вимірювання температур складала 0,5 К, а освітленості ± 3 %, провідності ± 10 %. Криостати для створення низьких температур являли собою кварцові посудини Дьюара або посудини із пінопласту, заповнені рідким азотом. Проміжні температури між азотною і кімнатною досягались підігрівом за допомогою біфілярно намотаної ніхромової спіралі.

Виготовлення надійних омичних контактів, які не руйнують плівку і задовольняють всім необхідним вимогам [4, 5], 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 в якості омичного контакту до плівок з дірковою провідністю використовували срібло, срібну пасту, а до плівок з електронною провідністю - індій. Як з'єднувальні елементи – срібний і мідний провід діаметром (0,01-0,05) мм. Для зменшення загального електричного опору плівкового матеріалу контакти напилювали у вигляді прямокутників на невеликій відстані один від одного (рис. 1.) Контроль властивостей виготовлених контактів проводився шляхом аналізу ВАХ зразків [3]. Тип провідності визначався за знаком термо-е.р.с. [3]. Товщину тонких плівок визначали оптичним методом за допомогою мікроінтерферометра МП-4. При цьому забезпечувалась точність $\sim 0,02$ мкм.

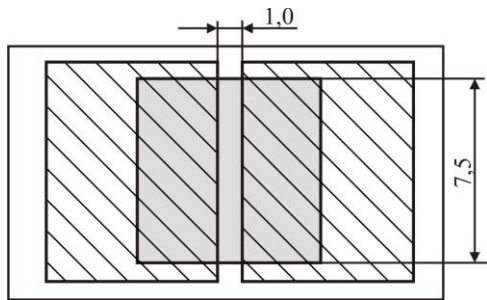


Рис. 1. Можлива конфігурація зразка для вимірювання електричних параметрів тонких плівок.

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 STM32152C8T6, який характеризується широко розвинутою периферією. Зокрема має вбудований апаратний USB для зв'язку з комп'ютером, багатоканальний 12 бітний аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) для оцифровки аналогових сигналів з терморезистора, шунтів 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.

Зв'язок з комп'ютером на апаратному рівні через вбудований USB мікроконтролера, а на програмному за допомогою інтерпретатора текстових команд, що забезпечує двосторонній обмін даними між керуючою програмою на комп'ютері та мікроконтролером установки.

Генератор високої напруги зібраний на мікросхемі OZ960 (рис. 3) в стандартному включенні і налаштований так що при навантаженні на ланцюжок з 4 резисторів загальним опором 200 кОм видає напругу 1200 В, різні напруги знімаються з відводів резисторів випрямляються високовольним швидким діодом, згладжуються конденсатором і через комутаційний вузол подаються на зразок. Увімкнення подачі напруги на зразок реалізована на електромеханічних реле які управляються мікроконтролером або здійснюється вручну.

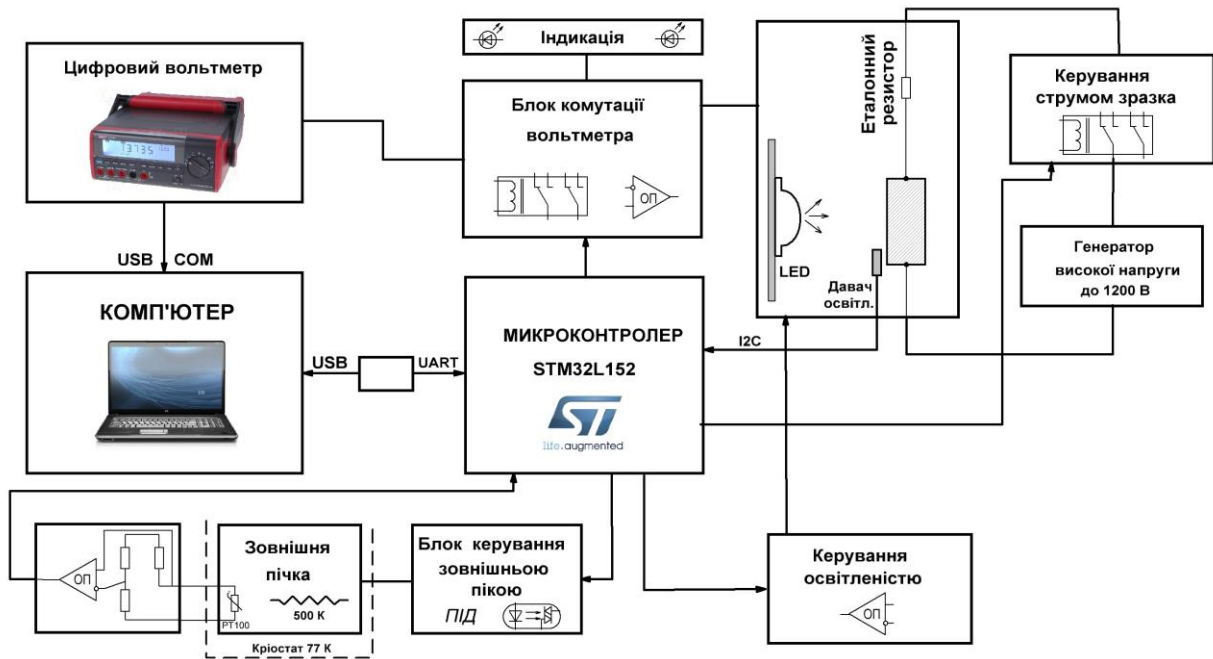


Рис. 2. Функціональна блок-схема установки автоматизованих вимірювань фотоелектричних параметрів високоімпедансних напівпровідникових плівок.

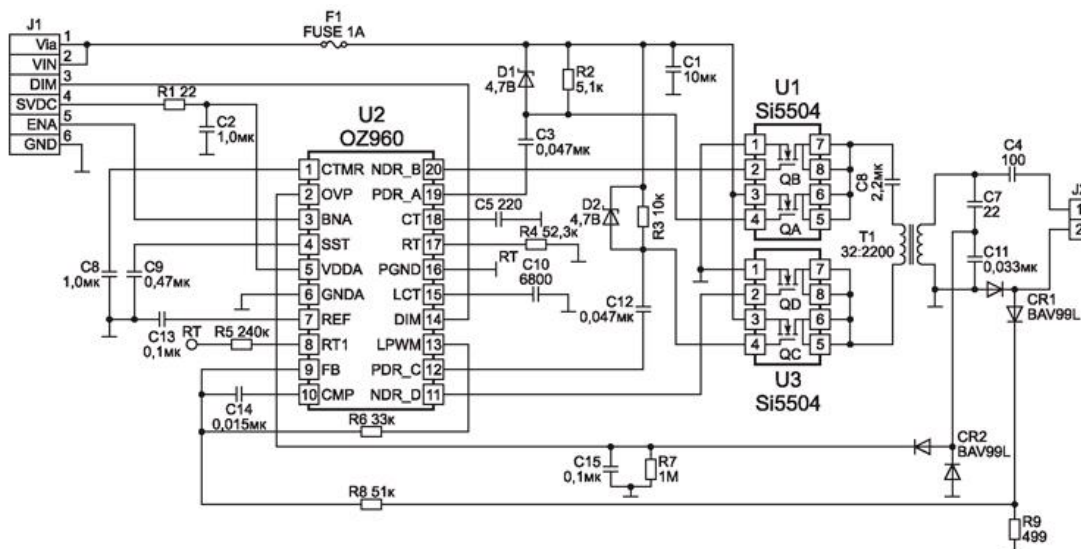


Рис. 3. Електрична принципова схема блоку генерації високої напруги.

Увімкнення світлодіода та установка заданої освітленості здійснюється ЦАП мікроконтролера через стабілізатор струму на операційному підсилювачі (рис. 4). Зворотній зв'язок здійснюється як по струму світлодіода отриманому з шунта так і по освітленості з змінного цифрового I2C давача освітленості, зокрема VEML7700CT, VEML6075. Зміна частоти світлового випромінювання здійснюється вручну, заміною світлодіода.

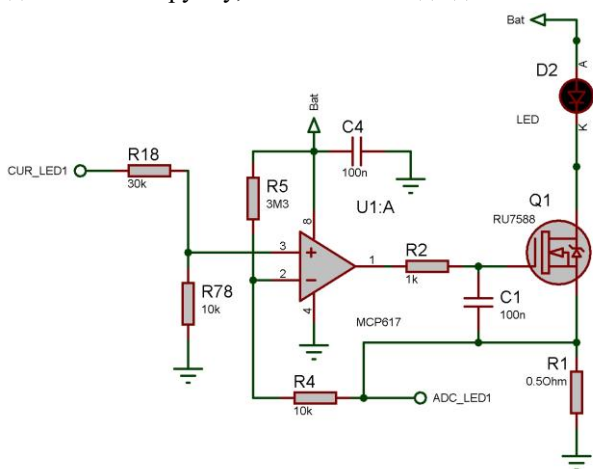


Рис. 4. Електрична схема стабілізатора струму світло діода.

Температура вимірюється платиновим терморезистором RT100 ввімкненим в мостову схему (рис. 5), яка живиться від прецизійного джерела опорної напруги AD1583. В якості резисторів у плечах моста використано 0,1% SMD резистори з малим ТКО.

Управління нагрівачами забезпечується симісторним регулятором, з комутацією при переході напруги через нуль та опторозв'язкою на оптосимісторі МОС3031. Стабілізація температури зовнішньої пічки здійснюється за допомогою пропорційного (ПД) алгоритму.

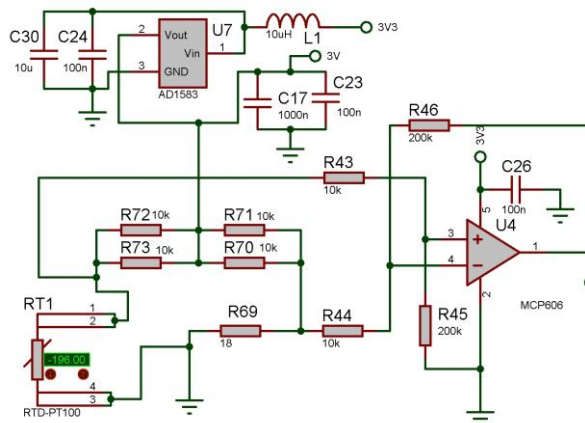


Рис. 5. Електрична мостова схема вимірювання температури.

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 металеву кришкою, а високовольтну частину винесено в окремий корпус і живлено від акумуляторної батареї напругою в 6 В.

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, 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 USB інтерфейс, 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 одиничні вимірювання електричних параметрів (а після внесення даних про геометричні розміри зразка з автоматичним розрахунком питомої провідності), 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.

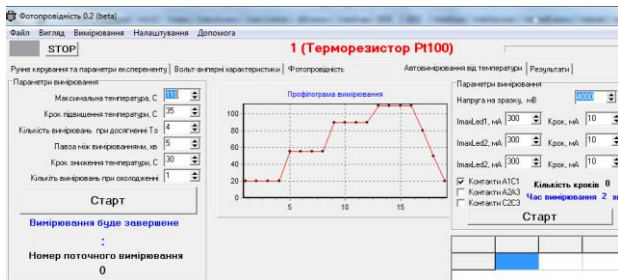


Рис. 6. Загальний вигляд вікна установки автоматизованих вимірювань керуючої програми для фотоелектричних параметрів напівпровідникових плівок.

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. В подальшому планується інтеграція з іншими установками для дослідження параметрів напівпровідників в єдину базу даних.

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

IV. Результати тестових вимірювань високоімпедансних зразків

Проведено серію вимірювань тестових резисторів з відомим опором і точністю, результати всіх вимірювань аж до 10 Гом вписалися в паспортну точність для вимірювальних елементів. Для резисторів до 100 кОм похибка складала 1 %, для резисторів 1-100 МОм – 3 %, а номінали 1-10 ГОм – 5 %.

Конфігурація вимірюваних зразків показана на рис. 1, заштрихованими прямокутниками нарисовані срібні контактні площадки, сірим прямокутником

напівпровідникова високоомна плівка отримана термічним випаровуванням у вакуумі. Результати вимірювання вольт-амперної характеристики реальних зразків CdTe приведено на рис. 7. Бачимо, що до напруги 600 В вольт амперна характеристика лінійна і проходить через початок координат, даючи стабільно опір в 300 ГОм, при подальшому збільшенні напругими опір зразка різко зменшується до 150 - 120 ГОм, що може бути пов'язано з мікропробоем в полікристалічному зразку.

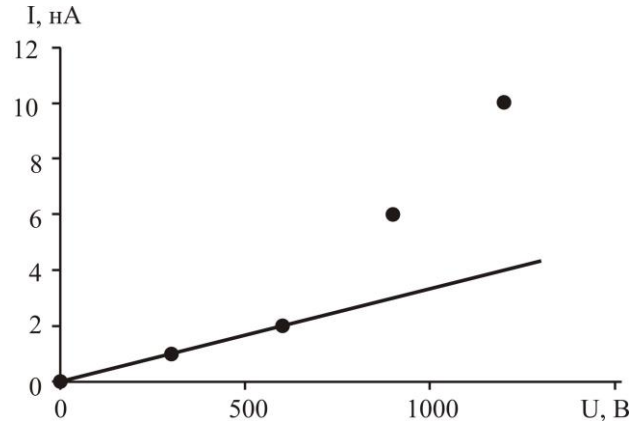


Рис. 7. Вольт амперна характеристика плавки CdTe товщиною 540 нм.

Дослідження фотопровідності проводили при напрузі 600 В, освітлення здійснювали інфрачервоним триватним світлодіодом з довжиною хвилі 940 нм. Залежність питомого опору від приведеної освітленості наведено на рис. 8.

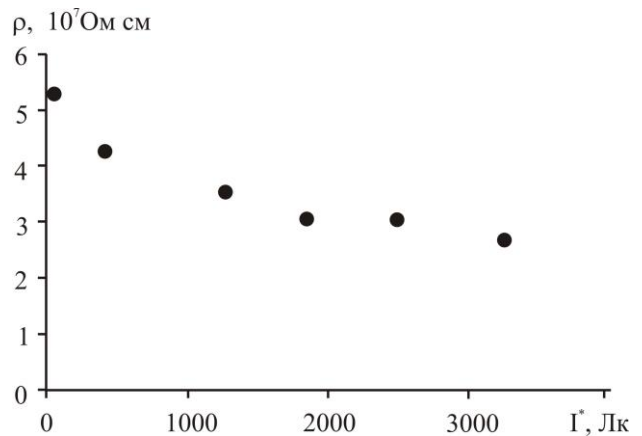


Рис. 8. Залежність питомого опору повіки CdTe товщиною 540 нм від освітленості.

Результати вимірювань питомого опору добре узгоджуються з даними наведеними в літературі для плівок такого ж хімічного складу отриманих аналогічними методами.

Завдяки використанню сучасної елементної бази і мікросхем високого ступеня інтеграції, вдалося реалізувати відносно просту і недорогу схемотехніку і конструкцію установки яка дозволяє використовувати її не тільки для наукових досліджень, а і в навчальному процесі для виконання лабораторних робіт з напівпровідникового

матеріалознавства.

Робота частково виконана у рамках наукового проекту МОН України (державний реєстраційний номер 0117U002407).

Висновки

1. Розроблена електрична схема, та сконструйована діюча установка вимірювання електричних та фотоелектричних параметрів високоімпедансних напівпровідникових плівок.

2. Створена комп'ютерна програма що забезпечує автоматизацію вимірювань, реєстрацією і первинною обробку даних, з можливість побудови графіків часових та температурних залежностей.

Прокопів В.В. – професор, кандидат фізико-математичних наук, завідувач кафедри фізики і хімії твердого тіла;

Дзундза Б.С. – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник;

Мазур Т.М. – аспірант;

Юрчишин Л.Д. – кандидат хімічних наук, редактор журналу.

- [1] D. M. Freik, V. M. Chobanyuk, L. I. Nikiryu, *Physics and Chemistry of Solid State* 7(3), 405 (2006).
- [2] D. M. Freik, V. M. Chobanyuk, O. S. Krynitsky, I. V. Horichok, *Physics and Chemistry of Solid State* 13(3), 744 (2012).
- [3] T. M. Razykov, K. M. Kuchkarov, B. A. Ergashev, A. . Khubbimov, M. K. Khakkulov, Effect of chloride treatment on the electrophysical properties of CdTe films obtained by the XMPO method. Conference dedicated to the 80th anniversary of Academician M.S. Saidov (Tashkent, 2010). Pp. 265.
- [4] E. V. Kuchis, *Methods for studying the Hall effect* (Soviet Radio, Moscow, 1974).
- [5] N. F. Kovtonyuk, *Measurement of parameters of semiconductor materials* (Metallurgy, Moscow, 1970).
- [6] Yu. V. Klevkov, S. A. Kolosov, A. F. Plotnikov, *Physics and Technology of Semiconductors* 41(6) 323 (2007).

B.S. Dzundza, V.V. Prokopiv, T.M. Mazur, L.D. Yurchyshyn

Automatization of Measurements of Photoelectric Parameters of High Impedance Semiconductor Films

*Vasyl Stefanyk Precarpathian National University
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine, E-mail prkvv@i.ua*

A method for measuring the electrical conductivity and photoconductivity of semiconductor films with high electrical resistance is described. An electric circuit is presented and a computer program is developed. That provides automation of measurements, registration and initial processing of data, the possibility of constructing timelines graphs for preliminary analysis of experimental data already in the process of measurement.

Key words: electrical parameters, photoconductivity, automation, microcontroller.