

окислення металов // Хим. фізика. – 1983. – Т. 2. № 8, – С.1042–1045. 8. Пайкуш В.А., Іванків О.Л., Андрусик І.Я. Оцінка стану ліпідної пероксидації плазми крові у дітей з онкозахворюваннями методом хемілюмінесценції // Практична медицина. – 2003. – Т. 9. № 1. – С.133–135. 9. Воейков В.Л., Химич М.В. Усиление аргонмлюминолзависимой хемілюмінесценції в водном растворе  $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}_2$  // Биофизика. – 2002. – Т. 47. № 1. –С.5–12.

УДК 535.36

І.Є. Лопатинський, О.Є. Сушинський\*  
 Національний університет “Львівська політехніка”  
 кафедра фізики, кафедра електронних приладів\*

## ВИСОКОКОНТРАСТНІ РІДКОКРИСТАЛІЧНІ МОДУЛЯТОРИ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

© Лопатинський І.Є., Сушинський О.Є., 2003

**Досліджено процес розсіювання лазерного випромінювання в шарі індукованого холестерика. Запропоновано шлях збільшення величини контрасту для рідкокристалічних модуляторів на основі холестерико-нематичного переходу. Досліджувались суміші індукованих холестериків на трьох довжинах хвиль лазерного випромінювання 0,63 мкм, 1,15 мкм і 3,39 мкм із використанням запропонованої конструкції рідкокристалічної комірки.**

**The light scattering of laser radiation in induced cholesteric layers was investigated. The ways of contrast incrising for liquid crystal modulators based on cholesteric-nematic transition was repressed. The investigation of induced cholesteric mixtures was on the three waves of laser radiation 0,63 mkm, 1,15 mkm і 3,39 mkm and in the represented liquid crystal cells.**

Багатогранність завдань, які вирішуються за допомогою модуляторів випромінювання, обумовлює необхідність створення приладів із різними властивостями та параметрами.

Принципи модуляції світла, які використовуються в модуляторах світла, давно є загальновідомими. У більшості випадків вони базуються на зміні дійсної або уявної частини діелектричної проникності середовища, що приводить, відповідно, до модуляції фази або амплітуди випромінювання. Модуляція також можлива при деформації (внутрішній пружній або зовнішній геометричній) або структурних змінах середовища, які приводять до локальної зміни показника заломлення чи рельєфу поверхні матеріалу, до обертання площини поляризації хвилі випромінювання або до зміни здатності середовища розсіювати світло.

Сьогодні створення рідкокристалічних модуляторів лазерного випромінювання викликає великий інтерес, якому сприяє швидкий розвиток сучасної електроніки. Порівняно з твердотільними модуляторами рідкокристалічні є перспективнішими, оскільки дозволяють створювати компактні, з малим енергоспоживанням, дешеві модулятори лазерного випромінювання, сумісні з інтегральною схмотехнікою. Отже, існує потреба подальшого пошуку матеріалів, дослідження електрооптичних ефектів і створення приладів, які задовольняли б основні вимоги, а саме високі значення контрасту і глибини

модуляції, менші періоди вмикання і вимкнення, низькі керуючі напруги. З цієї точки зору перспективним є дослідження холестерико-нематичного переходу в індукованих холестериках і створення на його основі модуляторів лазерного випромінювання, особливо для ІЧ-діапазону лазерного випромінювання. Головною перевагою ХНП є його приналежність до розсіювальних ефектів. Проблемою при створенні рідкокристалічних модуляторів на ХНП є низьке значення контрасту. Шляхи підвищення контрасту залежать від обґрунтування процесів розсіювання лазерного випромінювання. Отже, існує необхідність у створенні моделі розсіювання лазерного випромінювання індукованими холестериками і пошуку шляхів підвищення відносної величини контрасту для модуляторів на основі ХНП.

Ефект холестерико-нематичного переходу в індукованих холестериках виникає в холестеричних рідких кристалах (ХРК) при умові додатної діелектричної анізотропії ( $\Delta\epsilon > 0$ ) в електричному полі. При умові тангенціальних граничних умов переходу в квазінематичний стан передують текстурний перехід (ТП). Цей суто польовий ефект не вимагає проходження струму, внаслідок чого зменшуються енергозатрати. Цей ефект є розсіювальним, тому пристрій не вимагає поляризаційної оптики, як при використанні твіст- або супертвіст-ефектів. Крім цього, використання індукованих холестериків як рідкокристалічного матеріалу [1] дозволяє суттєво знизити керуючі напруги. Характер зміни інтенсивності світла, що пройшло через комірку, від величини прикладеного поля істотно залежить від таких параметрів суміші, як крок надмолекулярної структури, константа пружності Франка, величина діелектричної анізотропії. Сам характер зміни інтенсивності від величини прикладеної напруги буде визначати основні параметри конкретних пристроїв.

Рідкі кристали належать до категорії мутних середовищ, в яких розсіювання світла може як мати молекулярну природу, так і відбуватися на доменній структурі [1]. Крім цього, можна спостерігати селективне розсіювання світла на холестеричній спіралі. Цей механізм обумовлений властивостями конфокальної текстури холестеричної фази, в якій осі спіралей розташовані хаотично. Розміри розсіювальних зразків індукованих холестериків можна визначити, вимірюючи спектральну залежність прозорості рідкокристалічного шару. Проте цей метод є малоприматним внаслідок складної залежності показника заломлення від довжини хвилі випромінювання, особливо в середній інфрачервоній області [2]. Тому основним методом для вирішення проблеми вибрано метод кутової залежності інтенсивності розсіяного світла при фіксованій довжині хвилі. Дослідження проводились на трьох довжинах хвиль – 0,63 мкм, 1,15 мкм та 3,39 мкм.

Експериментальна установка для вимірювання кутової залежності інтенсивності розсіяного світла при фіксованій довжині хвилі зібрана на основі рентгенівського гоніометра ГЦР-5, який дозволив фіксувати кут розсіювання з точністю 20". Як джерело світла використовувався одномодовий гелієво-неоновий лазер ЛГН-207, а приймачем розсіяного випромінювання служив фотопомножувач з діафрагмою.

Для створення надмолекулярної спіральної структури використовувалась малопрцентна (до 2 ваг. %) нерідкокристалічна оптично активна домішка (ВІХН – 3). Використання немезогенної домішки ВІХН – 3, яка характеризується високою закручувальною здатністю, дало змогу реалізувати умови отримання  $d/P_0$  (де  $d$  – товщина рідкокристалічної комірки, а  $P_0$  – недеформований крок індукованої спіралі) в межах від  $< 1$  до  $\ll 1$ . Як базову нематичну матрицю було обрано серійну нематичну матрицю з такими параметрами:  $\Delta\epsilon = +25$  (при 293 К);  $\Delta n = 0.2$ ;  $\eta = 39$  спз;  $T_{пл} = 258$  К;  $T_{пр} = 323$  К.

Згідно з теорією розсіювання світла на "м'яких" частинках основним параметром, що визначає індикатрису розсіювання та прозорість системи, є величина:

$$\rho = \frac{2\pi R}{\lambda},$$

де  $R$  – радіус розсіюючої частинки.

Характер розсіювання буде визначатися співвідношенням величини  $\rho$  та довжини хвилі, або лінійних розмірів розсіювальних частинок та довжини хвилі. Якщо відносний показник заломлення рідкого кристала є близьким до 1 і розміри розсіювальних частинок знаходяться в межах довжини хвилі, можна застосувати наближення Релея–Ганса.

Кутовий розподіл інтенсивності розсіяного світла в наближенні Релея – Ганса описується формулою:

$$I(\beta, R) = I_0 \alpha^2 \frac{16\pi^4}{\lambda^4} v^2 \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} f^2(q) \quad (1)$$

Для порівняння з експериментальною залежністю використовувалась приведена індикатриса (рис. 3.6), нормована на інтенсивність світла, розсіяного вперед.

Розсіювання світла полідисперсною системою в наближенні одноразового розсіювання описується індикатрисою  $I(\beta)$ :

$$I(\beta) = \int_0^{\infty} I(\beta, R) \cdot F(R) dR \quad (2)$$

де  $F(R)$  – спектр частинок у системі. Ця задача в наближенні "м'яких" частинок була розв'язана Шифріним [4]. Обчислену в цьому наближенні функцію розподілу  $F(R)$  на довжині хвилі 0,63 мкм і при напрузі на зразку 4 В наведено на рис. 1 (крива 1). Як видно з рисунка, функція  $F(R)$  має три максимуми, причому два є менш інтенсивними при  $R = 0,83$  мкм і при  $R = 1,3$  мкм і один більш інтенсивний при  $R = 2,1$  мкм. Як виявилось, частинок з радіусом 2,1 мкм є в 15 разів більше ніж частинок радіусом 0,83 мкм.

Функція розподілу при напрузі 10 В (рис. 1, крива 2) із співставлення цих функцій видно, що з ростом напруги на зразку кількість частинок із більшим розміром зростає, а система стає полідисперсною.

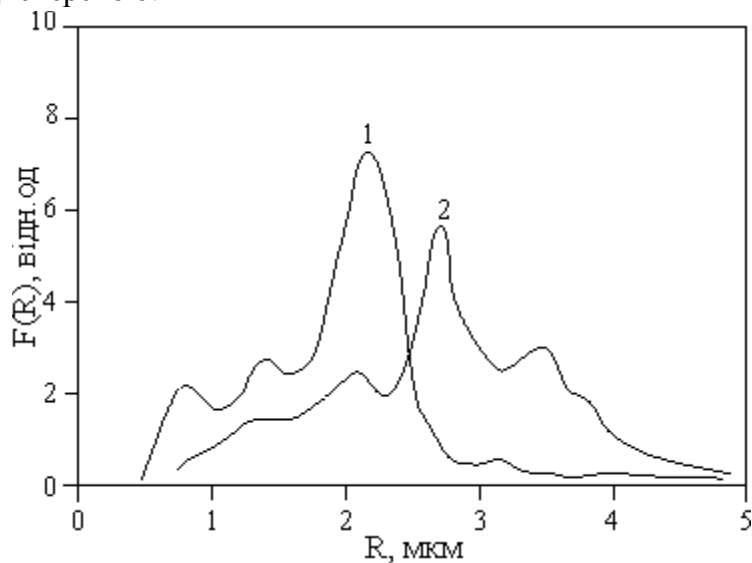


Рис. 1. Спектр частинок у системі  $F(R)$  при напрузі на зразку: 1 – 4 В, 2 – 10 В

Всі одержані результати справедливі в наближенні одноразового розсіювання. Багаторазове розсіювання можна враховувати в рамках геометричної оптики. Результатом цього наближення є гауссова форма індикатриси розсіювання у випадку багаторазового розсіювання:

$$I(\beta) = A \exp\left(-\frac{\beta^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

де  $A = \text{const}$ , а  $\sigma$  – півширина лінії.

На рис. 2 наведено залежність інтенсивності розсіяного світла від квадрата кута розсіювання при різних напругах на зразку. Якщо побудована залежність інтенсивності розсіювання від квадрата кута розсіювання за певної напруги на зразку набуває лінійного характеру, це свідчить про те, що багаторазовим розсіюванням для цих значень поля нехтувати не слід (6).

Створення рідкокристалічних модуляторів лазерного випромінювання на ефекті холестерико-нематичного переходу потребує цілісного обґрунтування і пояснення процесів, які відбуваються при введенні оптично активної домішки в нематичну матрицю, процесів розсіювання світла шаром індукваного холестерика. Насамперед проблема ускладнюється тим, що рідкокристалічні модулятори лазерного випромінювання належать до оптоелектронних приладів, які використовуються для керування характеристиками лазерного променя, що, в свою чергу, здійснюється за допомогою електричних схем. Тобто створення рідкокристалічних модуляторів лазерного випромінювання повинно визначатись, по-перше, конкретними завданнями їх застосування, а по-друге, особливостями роботи модуляторів в практичних оптоелектронних пристроях та системах.

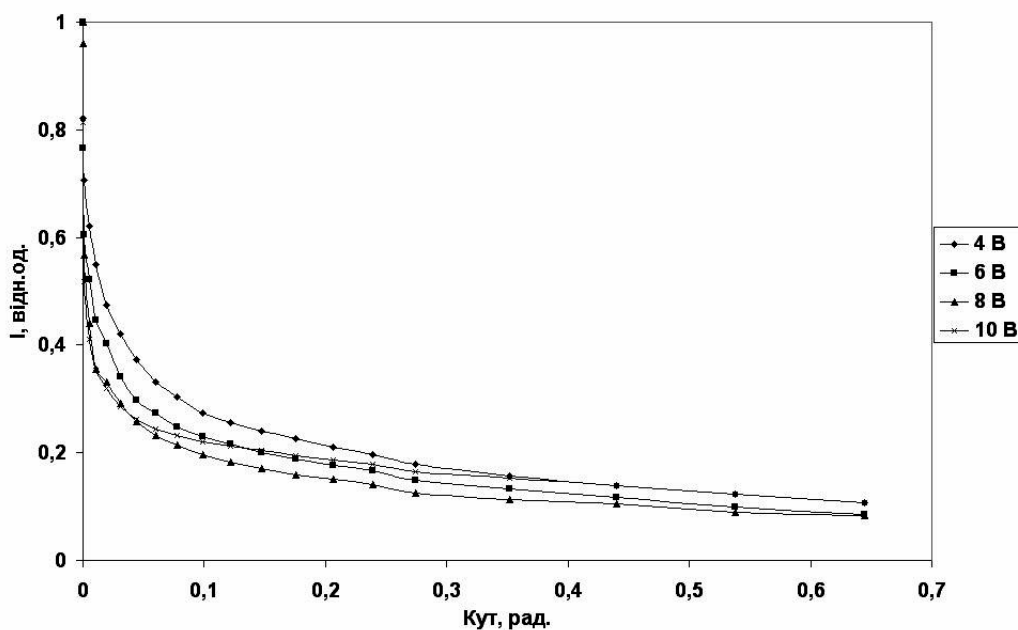


Рис. 2. Залежність інтенсивності розсіяного світла від квадрата кута розсіювання при різних напругах на зразку

Динаміка трансформації рідкокристалічних текстур під дією електричного поля визначатиме основні модуляційні характеристики цих матеріалів. Модуляційні характеристики досліджувались керуючими сигналами різної форми (прямокутник, трикутник,

пилка) з амплітудами, що дорівнюють  $2U_{\text{сн}}$  в діапазоні частот від 1 до 100 Гц. При цьому глибина модуляції визначалася за формулою (4):

$$m = 1 - \frac{I_{\text{min}}}{I_{\text{max}}} \quad (4)$$

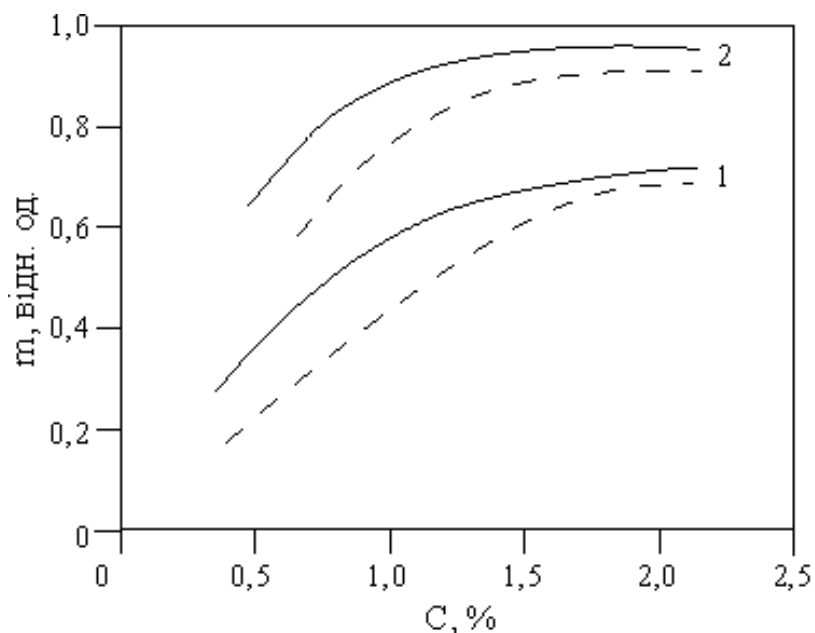


Рис. 3. Залежність глибини модуляції від концентрації для сумішей на основі нематичної матриці СЖК з оптично активною домішкою: 1 – ВІХН – 3; 2 – ОАДІ при частотах керуючого сигналу - - - - - 10 Гц, і ———— 25 Гц

Наведені у формулі (4) величини  $I_{\text{min}}$ ,  $I_{\text{max}}$  відповідають значенням інтенсивності світла, що проходить через комірку з розсіювальною конфокальною холестеричною ( $I_{\text{min}}$ ) та прозорою нематичною ( $I_{\text{max}}$ ) текстурами.

Особливістю амплітудної модуляції світла на ефекті ХНП є те, що крім двох крайніх значень інтенсивності промодульованого світла  $I_{\text{max}}$  та  $I_{\text{min}}$  існує ряд проміжкових положень з інтенсивностями  $I_{\text{min}} < I_i < I_{\text{max}}$ . Максимальну глибину модуляції можна отримати лише у випадку, коли параметри керуючого імпульсу будуть задовольняти такі умови:

$$\tau_i > \tau_{\text{вмик}}; \quad T - \tau_i > \tau_{\text{вимк}}$$

Лише в цьому випадку інтенсивність промодульованого світла буде коливатися між двома крайніми значеннями  $I_{\text{max}}$  та  $I_{\text{min}}$ . На рис. 4 наведено експериментальні залежності глибини модуляції від частоти керуючого сигналу для різних концентрацій ОАД.

Як видно з рис. 4, величина глибини модуляції спадає з ростом частоти керуючого імпульсу для всіх сумішей в усьому дослідженому діапазоні, що, на нашу думку, можна пояснити зменшенням величини  $\Delta I$  при зростанні частоти. Отже, спадання глибини модуляції з ростом частоти керуючого сигналу обумовлено наявністю процесів реакції та релаксації, і, відповідно, гранична частота модуляції залежить від співвідношення часів вмикання і вимкнення.

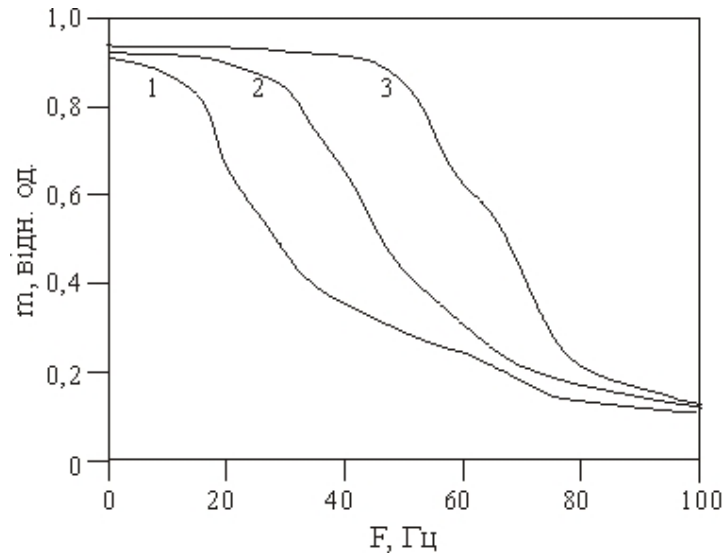


Рис. 4. Частотні залежності глибини модуляції для сумішей на основі нематичної матриці СЖК з оптично активною домішкою VLN-3: 1 – 0,6%, 2 – 1%, 3-1,7%

Збільшення концентрації оптично активної домішки в нематичній матриці приводить до незначного збільшення розмірів конфокальних доменів і зростання їх концентрації, внаслідок чого зростає розсіювання на цих доменах та величина контрасту.

З метою підвищення відносної величини контрасту таких модуляторів в наших дослідженнях було використано двошарову рідкокристалічну комірку.

Створення структури типу “сендвіч” шляхом введення третього і більше вікон із напиленими провідними покриттями та орієнтуючими шарами дозволяє зберегти низьку напругу керування модулятором при загальному збільшенні товщини рідкокристалічного шару всієї конструкції модулятора, тобто створювати рідкокристалічні модулятори для будь-якої наперед заданої потужності спадного лазерного випромінювання, покращуючи тим самим електрооптичні характеристики модулятора, зберігаючи низькі напруги керування, часи вмикання – вимикання та низьке споживання енергії, властиве рідкокристалічними приладам [5].

### Висновки

Для створення рідкокристалічних модуляторів лазерного випромінювання є перспективним використання розсіювальних електрооптичних ефектів, а саме ефекту холестерико-нематичного переходу в індукованих холестериках. Проведений аналіз процесів розсіювання лазерного випромінювання дозволив встановити характер розсіювання і можливості покращання електрооптичних характеристик модуляторів лазерного випромінювання. Встановлено, що зразок індукованого холестерика в процесі текстурного та холестерико-нематичного переходу являє собою конфокальну доменну структуру, причому розміри конфокальних доменів залежать від величини прикладеного поля, а саме, збільшення величини поля приводить до зменшення розмірів конфокальних доменів. Встановлено, що зростання величини контрасту за рахунок збільшення кількості частинок, що розсіюють світло, приводить до збільшення глибини модуляції, що покладено в основу розробки висококонтрастного рідкокристалічного модулятора.

1. Данилов В.В., Данилов О.Б., Сидоров А.И. Управление генерацией CO<sub>2</sub>-лазера с помощью фазового холестерико-нематического перехода // Письма в ЖТФ. – 1991. – Т. 17, № 21 – 5–12. 2. Яковенко С.С., Вистинь Л.К. Применение метода инфракрасной спектроскопии для определения ориентации молекул в слоях жидкого кристалла // Кристаллография. – 1996. – Т.2, № 3. – С.571–573. 3. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде. – М., 1953. – 326 с. 4. Пат. 44398 А Україна, МПК 7 G02F1/13 Спосіб виготовлення рідкокристалічного модулятора / З.М. Микитюк, О.Є. Сушинський, М.С. Нуцковський, В.Г. Іваницький – № 2000031577; Заявл. 21.03.2000. 5. Mikityuk Z., Fechan A., Semenova J. Sushynsky O. The features of amplitude modulation on the base of cholesteric-nematic phase transition // Optical Review, Poland. – 1996, Vol. 1. – P.14–24. 6. Микитюк З.М., Сушинський О.Є., Черпак В., Іваницький В.Г. Селективне розсіювання на конфокальних доменах індукованих холестериків // Вісник Держ. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2001. – с.86–92. 7. Mikityuk Z.M., Fechan A., Nevmerzhytska O. Sushynsky O. The Anomalous behavior of inversed CNPT critical Field // Abstract of European conference on liquid crystals. – Zakopane, Poland. – 1997. – С. 336. 8. Пат. 29677 А Україна, МПК 6 G02F 1/13 Спосіб виготовлення модуляторів ІЧ-випромінювання / З.М. Микитюк, М.С. Нуцковський, Л.М. Вернікова, О.Є. Сушинський – № 96103771; Заявл. 01.10.1996; Опубл. 15.11.2000. Бюл. № 6 с. 11.

УДК 621.3.049.776.43:621.791.4

Д.Т. Дячок, В.А. Павлиш\*, Л.М. Смеркло

\*Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електронних засобів інформаційно-комп’ютерних технологій,  
Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут

## СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ КОНТАКТНОГО З’ЄДНАННЯ МІКРОДРОТУ І ПЛІВКОВОГО ПРОВІДНИКА

© Дячок Д.Т., Павлиш В.А., Смеркло Л.М., 2003

**Розглянуто питання вимірювання електричного опору мікроконтактного з’єднання дроту і плівкового провідника в інтегральних мікросхемах і мікроскладаннях. Запропоновано спосіб, який підвищує точність вимірювання.**

**The problems of measurement of electrical resistance of mikrocontact connection of wire and film conductor in integrated microcircuits and microassemblies are considered. The new method which improves measuring precision is proposed.**

**Вступ.** Контактні з’єднання мікродроту і плівкового провідника продовжують надалі широко використовуватися в мікроелектроніці. Важливим параметром, за яким оцінюється якість мікроконтактного з’єднання, є його низький електричний опір. Для його вимірювання найчастіше використовують метод амперметра–вольтметра та різні мостові схеми [1]. Відомі сьогодні способи вимірювання опору або складні [2], або не завжди задовольняють вимогу достатньої точності [3, 4, 5, 6]. Основними проблемами, які доводиться при цьому вирішувати, є усунення або зменшення впливу на результат вимірювання контактних опорів вимірювальних зондів, величина яких одного порядку з опором мікроконтактного з’єднання, а також опорів дільниць дроту і плівкового провідника, які при вимірюванні входять в ділянку поміж вимірювальними зондами.