

### 3. Conclusions

The method of the analysis of the stability of two-channel control systems containing the optical fibre links as a through-coupling, applied in this work consists of the choice of such a function (22), which would map the left half plane of the plane of the complex variable „w” into a given region on the plane of the complex variable „s”. As a result, the question of testing the roots positioning in the given region on the plane of the complex variable „s” was reduced to a well-known question of the testing of the roots positioning in the left half plane of the complex variable „w”. Following that, the left half plane of the complex variable „w” was mapped by (35) and (45) into stability region on the plane of parameters  $\alpha$  and  $\beta$ .

1. Barskij A.G.: *Ustojcziwost dwukanalnych sistem awtomatyzeskowo regulirowania pri nieograniczonom koeficjencie usilenia antisymetrycznoj swiazi*, *Awtomatika i Telemekhanika*, Nr 1 1968. 2. Barskij A.G.: *Ustojcziwost triechkanalnych sistem awtomatyzeskowo regulirowania pri nieograniczonom koeficjencie usilenia antisymetrycznoj swiazi* // *Awtomatika i Telemekhanika*, Nr 1, 1967. 3. Bendrikow G.A., Ogrodnikowa W.J.: *Trajektorii kormiej dwuchkanalnych sistem s antisymetrycznymi perestnymi swiazaniami* // *Awtomatika i Telemekhanika*, Nr 4, 1967. 4. Eisenberg L.: *Stability of linear systems with transport lag*. *IEEE Trans. On Automatic Control*, April 1966. Vol. AC-11, No 2. 5. Dacka Cz., Wójcik W.: *Analiza stabilnosci układow automatycznej regulacji zawierajacych locza swiatlowodowe (The analysis of stability of automatic control system containing optical fibre links)*, *Siatlowody, analiza i zastosowania*, *Lubelskie Towarzystwo Naukowe*, Lublin 1997, pp. 64–75. 6. Holejko K.: *Podstawy telekomunikacji swiatlowodowej (Bases of fibre optic telecommunication)*. *Wyd. Francusko-Polskiej Wyszszej Szkoły Nowych Technik Informatyczno-Komunikacyjnych*, Poznań 1995.

УДК 621.372

**Г.П.Лаба, Я.В.Бобицький, О.П.Максименко\***

**ДУ “Львівська політехніка”, кафедра лазерної техніки та оптоелектронних систем**

**\*Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка, НАН України**

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМИ ПОЛІМЕРНИХ ПЛОСКООПУКЛИХ МІКРОЛІНЗ**

© Г.П.Лаба, Я.В.Бобицький, О.П.Максименко, 2000

**Подано наочний метод оцінки форми мікролінз, виготовлених полімеризацією лежачої краплини фоточутливої композиції. Розраховано відхилення виготовлених зразків від заданої кривизни.**

**In this paper the method for estimation of shape of microlenses formed by polymerization of sessile drop of photosensitive composition is considered. Curvature deviation of formed samples from specific curvature is calculated.**

Скляні і полімерні мікролінзи широко застосовують як фокусуєчі пристрої для підвищення ефективності вводу випромінювання між окремими елементами волоконно-оптичних систем [1].

У деяких випадках доцільно використання саме полімерних мікролінз [2]. Вони дешевші від скляних і значно простіші у виготовленні та експлуатації. Втрати під час проходження світла через полімерні мікролінзи достатньо невеликі. Тому для багатомодових систем і при використанні полімерних волокон пластикові мікролінзи може бути дуже ефективним.

Запропоновано простий метод виготовлення мікролінз полімеризацією краплини fotocутливої рідкої композиції. У такий спосіб формуються плоско-опуклі оптичні елементи, опукла сторона яких при дії сил поверхневого натягу краплі і земного тяжіння набирає сферичної форми. Одним із важливих етапів дослідження сферичних лінз, взагалі, є перевірка її форми, оскільки відхилення поверхні від заданої кривизни приводить до фазових спотворень і до погіршення якості зображення [3]. Для цього використовується спосіб розрахунку апроксимаційного полінома на основі знятих точок з координатами (x,y) по контуру двовірної проекції мікролінзи [4].

У цій роботі пропонується наочніший спосіб дослідження форми мікролінз, який полягає у розрахунку відхилення кривизни плоскої проекції мікролінзи від кривизни правильного сегмента.

З цієї метою використовуються графічні зображення мікролінз, отримані при їх знімкуванні за допомогою ПЗЗ-камери (пристрій із зарядовим зв'язком) [5]. У такій системі оптичний сигнал, сформований в площині мікролінзи, проектується у вигляді сфокусованого зображення на поверхню реєструвальної ПЗЗ-матриці, яка входить в ПЗЗ-камеру. У ПЗЗ-камері оптичний сигнал як зображення реєструється у вигляді електричного сигналу і за допомогою спеціального інтерфейсу (фрейм-граббера) перетворюється в цифровий код, який надходить до персонального комп'ютера для подальшої обробки.

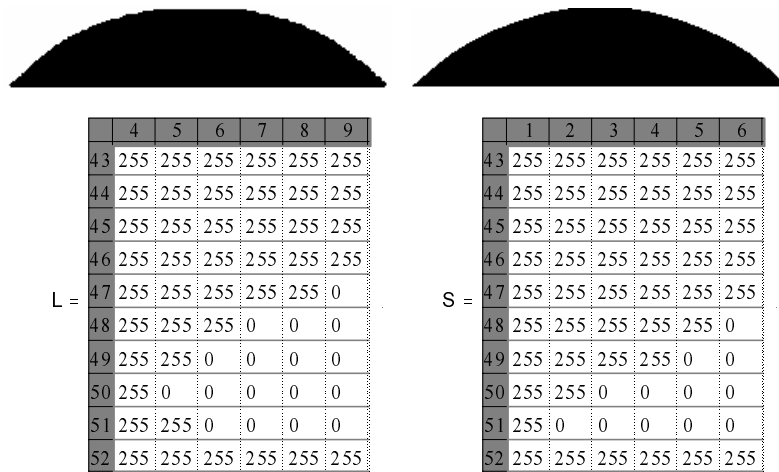
Знімки мікролінз у профіль подано на рис.1. Для повнішої оцінки поверхні і для отримання достовірніших результатів при обробці зображень мікролінзи фотографують в декількох площинах. Причому дані зразки сфотографовані на калібровочних підкладках, які виступають еталонними елементами при визначенні масштабних розмірів.



**Рис.1.** Знімки мікролінз у профіль, отримані за допомогою ОЦС

Аналіз форми мікролінзи полягає у визначенні відхилення її поверхні від шаблону. Як шаблон використовується правильний сегмент відповідного радіуса, який отримуємо підбором, що при наявності прикладних графічних програм не становить жодної проблеми.

Графічні зображення мікролінзи і сегмента перетворюємо у чорно-білі растрові зображення (рис.2). Вони описуються відповідними прямокутними  $L \equiv a_{ij}$  і  $S \equiv a_{ij}$  матрицями розміром  $m \times n$  ( $m$  – кількість рядків,  $n$  – кількість стовпців), двотипні елементи яких 0 і 255 визначають чорний і білий колір відповідно. Визначаємо матрицю  $V=S-L$ , в якій компоненти, відмінні від нуля, вказують на різницю між кривизною контурів зіставлених зраз-



**Рис.2.** Двовірна проекція мікролінзи (а) і зображення правильного сегмента (б) та відповідні матриці, які їх описують

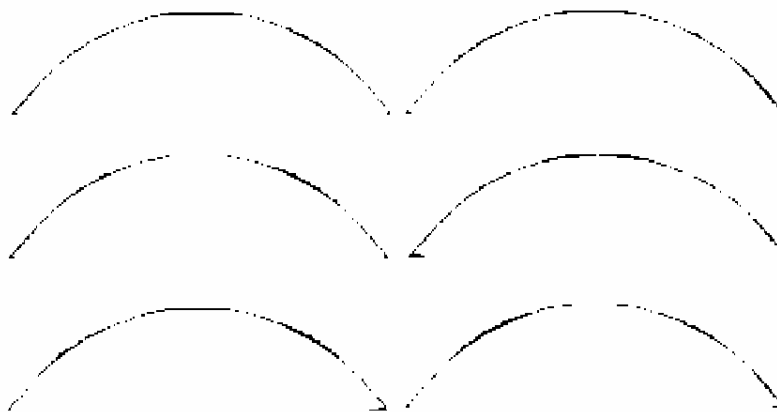
ків. Для повнішої уяви про всю поверхню на рис.3 показані контури проекцій, отриманих при обертанні мікролінзи навколо осі симетрії з кроком  $60^0$ . Як видно, форма мікролінзи симетрична. Зауважимо, що для зручності представлення ілюстраційного і розрахункового матеріалу кольори даних зображень конвертовані у протилежні.

Одержані після перетворення кольорів масиви розділимо на 255. В такому випадку елементи  $a_{ij}=1$  матриць  $L1=L/255$  і  $S1=S/255$  будуть визначати лінійні розміри проекції мікролінзи і сегмента у відносних одиницях (пікселях).

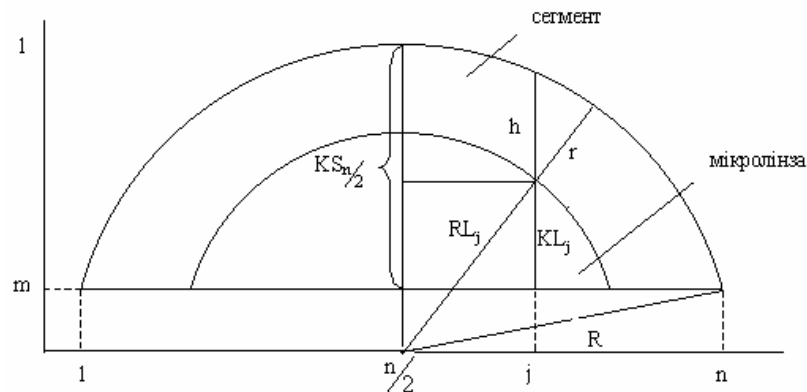
Для розрахунку різниці між зіставленими формами в кожному пікселі вздовж контуру кривизни потрібно просумувати всі елементи в кожному  $j$ -му стовпці кожної матриці відповідно і ці суми відняти, тобто

$$h_j = KS_j - KL_j, \quad (1)$$

де  $h_j$  – відхилення мікролінзи від правильного сегмента в  $j$ -му стовпці,  $KL_j = \sum_i L1_{ij}$  – сума елементів  $j$ -го стовпця  $L$  матриці,  $KS_j = \sum_i S1_{ij}$  – сума елементів  $j$ -го стовпця  $S$  матриці. Отриманий результат показує несумісність контурів кривизни по стовпцях матриці-різниці, тобто перпендикулярно до основи мікролінзи.



**Рис.3.** Відхилення кривизни досліджуваного зразка від заданої для 6-х проекцій



**Рис.4.** Схематичне представлення визначення відхилення радіуса кривизни мікролінзи від радіуса сферичної кривизни

Як відомо, поверхня певної кривизни характеризується її радіусом. Тому наведений вище розрахунок не дає вичерпної інформації про форму як таку. Отже, подальший аналіз полягає у визначенні відхилення вздовж радіуса кривизни.

Рис.4. пояснює геометричний шлях розрахунку. По осях абсцис і ординат відкладені n-колонок і m-рядків матриць, які обробляємо, відповідно. Розрахунок здійснюємо по n-стовпцях. Отже, для довільної колонки j (крок розрахунку), як видно з рисунку, маємо прямокутний трикутник, гіпотенуза якого дорівнює радіусу кривизни двомірної проекції мікролінзи RL. Тому

$$RL_j = \sqrt{\left(\frac{n}{2} - j\right)^2 + \left(R - KS_{n/2} + KL_j\right)^2}, \quad (2)$$

де j – номер поточної колонки, для якої здійснюємо розрахунок,  $\frac{n}{2}$  – номер колонки, яка збігається з віссю симетрії сегмента, R – заданий радіус кривизни,  $KS_{n/2}$  – величина  $\frac{n}{2}$ -колонки масиву сегмента, яка дорівнює його висоті,  $KL_j$  – величина поточної колонки матриці мікролінзи.

Оскільки ми маємо зображення в пікселях, а піксел має розмір  $\sim 13 \times 13$ , то величина заданого радіуса буде змінною в межах одного пікселя і дорівнюватиме заданому значенню лише, в даному випадку, по осі симетрії сегмента. Виходячи звідси, коректно порахувати і радіус кривизни сегмента RS. Отже:

$$RS_j = \sqrt{\left(\frac{n}{2} - j\right)^2 + \left(R - KS_{n/2} + KS_j\right)^2}, \quad (3)$$

де  $KS_j$  – величина поточної колонки матриці сегменту.

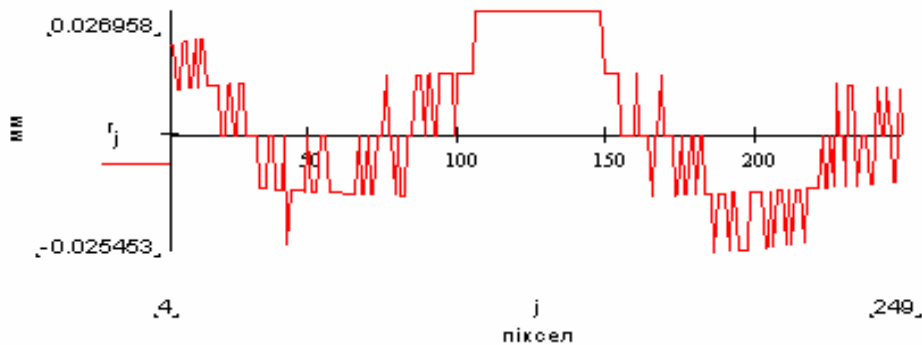
Отже, відхилення радіуса кривизни від заданого визначається як

$$r_j = RS_j - RL_j \quad (4)$$

Наведений алгоритм розрахунку без урахування масштабу. Масштаб визначаємо при наявності реального розміру калібрувальної підкладки, на якій сфотографована мікролінза, тобто

$$\text{масштаб} = \text{діаметр підкладки (мм)} / \text{розмір проекції підкладки (піксел)}$$

Графічно результат розрахунку відхилення радіуса кривизни з урахуванням масштабу подано на рис. 5.



**Рис. 5.** Графік залежності відхилення радіуса кривизни від кроку розрахунку

Для мікролінзи з радіусом  $R=2.42$  мм середня квадратична похибка результату становить 14,6 мкм, тобто порядку одного пікселя. Оскільки ми обробляємо зображення мікролінзи, а не сам об'єкт, то в дане число також входять похибки, які присутні при фотографуванні мікролінз за допомогою ОЦС. При цьому в інформаційний канал вносяться шуми і похибки, серед яких найбільший вплив на точність вимірювань мають шуми і похибки світлового поля, яке оточує краплю, викликані нерівномірністю освітлення і бликами на поверхні мікролінзи, а також шуми електронного каналу. З урахуванням цих похибок отримані лінійні розміри оцінюються з точністю до 1 пікселя  $\approx 0.2\%$ .

Виходячи із наведеного аналізу, бачимо, що форми досліджуваних зразків мають систематичні помилки. Так, сформовані поверхні дещо сплюснені. Такий результат спричинений впливом сили земного тяжіння і роздільною здатністю ОЦС. Другий фактор впливу на похибку – утворена по колу основи мікролінзи перехідна область. Однак ця область може бути виключена за допомогою відомих механічних засобів при використанні мікролінзи в оптичній системі. І третій аспект впливу на похибку виражається у деякій антисиметричності виготовлених зразків. Тут відбувається стікання рідини при неабсолютно горизонтальній поверхні, на якій виготовляється мікролінза. Слід зазначити, що форма мікролінзи залежить від властивостей рідини, від якості і фізико-хімічних характеристик підкладки, на якій формується краплина, а також від режимів процесу полімеризації. З урахуванням вищевикладеного сформовані мікролінзи цілком придатні для використання, причому їх поверхня не потребує додаткової корекції.

Наведений матеріал дає повну уяву про форму мікролінз, виготовлених методом полімеризації лежачої краплі фоточутливих рідких композицій, і дозволяє стверджувати про можливість формування плоскоопуклих мікролінз в такий спосіб.

1. Бутусов М.М. *Волоконно-оптические линии связи*. М., 1991. 2. Красюк Б.А., Корнеев Г.И. *Оптические системы связи и световодные датчики // Вопросы технологии*. М., 1985. 3. Афанасьев В.А. *Оптические измерения*. М., 1981. 4. St. Fantone. *Miniature aspheric lenses with spherical index gradients // Applied Optics*, 1994, Vol.33, No.4, p.561-564. 5. Муравський Л.І., Бачевський П.С., Вороняк Т.І. *Досвід використання оптико-цифрових систем для вимірювання капілярних характеристик матеріалів // Фіз.-хім. механіка матеріалів*, 1997, № 5. С. 81-87.