

# ФІЗИКА, ТЕХНОЛОГІЯ ТА ВИРОБНИЦТВО ЕЛЕМЕНТІВ, ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

УДК 621.372

Я.В. Бобицький<sup>1</sup>, Г.П. Лаба<sup>1</sup>, О.П. Максименко<sup>2</sup>, В.В. Шибанов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Національний університет “Львівська Політехніка”,  
кафедра лазерної техніки і оптоелектронних систем

<sup>2</sup>Фізико-механічний інститут ім. Карпенка НАН України

<sup>3</sup>Українська академія друкарства

## РОЗРОБКА СПОСОБУ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ МІКРОЛІНЗ

Ya.V.Bobitski, <sup>1</sup>H.P.Laba, <sup>2</sup>O.P.Maksymenko, <sup>3</sup>V.V.Shibanov

<sup>1</sup>NU “Lviv polytechnic”, chair of LTOS

<sup>2</sup>G.V. Karpenko Physiko-Mechanical Institute, 24-th section

<sup>3</sup>Ukrainian Academy of Printing, chair of PMCh

## DESIGN OF THE FABRICATION METHOD FOR POLYMERIC LENSES

© Бобицький Я.В., Лаба Г.П., Максименко О.П., Шибанов В.В., 2001

**Описано виготовлення мікролінз способом фотополімеризації лежачої краплі рідкої композиції. Теоретично визначено основні умови формування крапель із сферичною формою поверхні та експериментально підтверджено можливість виготовлення мікролінз з сферичною формою поверхні. Вивчено залежність між об'ємом рідкої композиції і радіусом кривизни мікролінз.**

**Method of fabrication of microlenses by photopolymerization of sessile drop of liquid composition is described. The main conditions of shaping of drop with spherical form of surface is theoretically determined and possibility of fabrication of microlenses with spherical form of surfaces is experimentally confirmed. Dependency between volume and radius of microlenses curvature is studied.**

**Вступ.** Потреба у великій кількості мікролінз, що знаходять застосування в оптоелектроніці, вимагає розробки та вдосконалення способів їх виготовлення, спрямованих на здешевлення і покращання якості мікролінз. Такі вимоги задовольняють способи виготовлення, які базуються на використанні як вихідного матеріалу для формування мікролінз рідких фоточутливих композицій. Серед них можна виділити способи обміну між мономером і підкладкою з використанням кінцевої термічної полімеризації, відливання у закритих інжекційних формах та у відкритих відцентрових формах з плоским і ввігнутим дном і на поверхні рідини, з провислих крапель мономерної композиції за допомогою мікростереофотолітографії [1–3]. Однак простотою, дешевизною та можливістю масового серійного виготовлення привертає увагу спосіб фотополімеризації лежачої краплі, який розробляється та вивчається нами.

Для успішної реалізації цього способу необхідно ров'язати низку конкретних науково-технічних завдань. А саме:

1. Підбір фотополімеризаційноспроможних матеріалів, які мають необхідні властивості:
  - механічні (твердість, еластичність, термічну стабільність);
  - хімічні (мале хімічне усадження, низька токсичність, спроможність полімеризуватися на повітрі);
  - оптичні (високу однорідність, прозорість, певні спектральні характеристики).
2. Забезпечення умов, при яких будуть утворюватися мікролінзи сферичної форми з заданим радіусом кривизни.

У цій роботі пропонуються основні теоретичні положення, необхідні для розв'язку іншого завдання, а також представлено результати тестування мікролінз, виготовлених способом фотополімеризації лежачої краплі.

**Схема способу виготовлення плосковипуклих полімерних мікролінз.** Для виготовлення мікролінз способом фотополімеризації лежачої краплі необхідно нанести краплю рідкої композиції на горизонтальну підкладку і заполімеризувати її за допомогою спеціального джерела випромінювання (рис. 1).

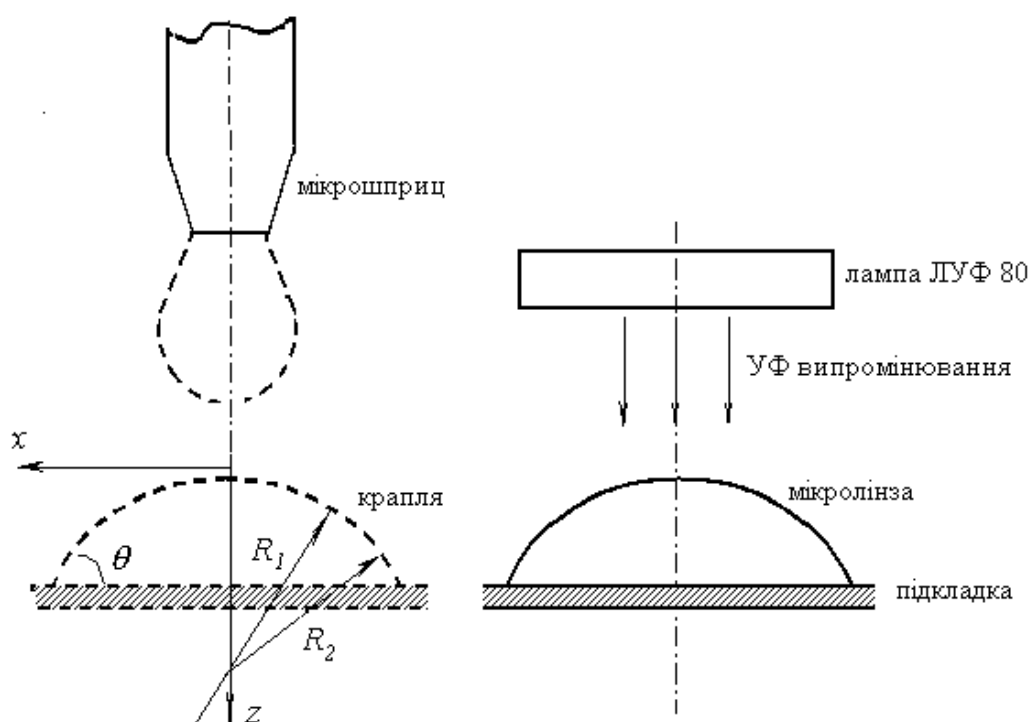


Рис. 1. Схема виготовлення мікролінзи фотополімеризацією лежачої краплі

За схемою виготовлення мікролінз краплі наносяться скапуванням. А, оскільки для їх дозування використовується об'єм, то його зручно задавати і наносити мікрошприцом. Дозування об'єму крапель є принципово важливим для реалізації масового серійного виготовлення. Для цього, насамперед, встановлюється залежність між геометричними розмірами мікролінзи, зокрема радіусом кривизни і об'ємом краплі.

Відомо, що рідина, нанесена на поверхню твердого тіла, в полі сили земного тяжіння при відсутності будь-якого зовнішнього впливу і взаємодії з підкладкою, утворює границю розділу з контактним кутом  $\theta$  і набуває форми краплі, яка є тілом обертання.

Як підкладки використовуються скляні пластини. Вони мають якісну поверхню, яка не взаємодіє з рідиною, легко очищаються та можуть бути використані як монтажні елементи під час експлуатації мікролінз. Також, враховуючи попередній досвід, який свідчить про істотний вплив якості поверхні підкладки на її форму, досліджується утворення краплі на скляній підкладці, покритій антиадгезивним матеріалом – гліцерином.

Оскільки до складу композиції обов'язково входить фотоініціатор, який чутливий в УФ області спектра, то для полімеризації сформованої рівноважної краплі використовується люмінесцентна УФ лампа ЛУФ-80, яка має неперервний спектр випромінювання ( $\lambda \div 310-410$ ,  $\lambda_{\max}=360$ ).

Отже, за цією схемою виготовлення мікролінз, після нанесення краплі і її фото-полімеризації, утворюється мікролінза певної геометричної форми.

**Теоретичні основи розрахунків та тестування.** Утворення краплі на горизонтальній поверхні твердого тіла в полі земного тяжіння – давно відоме явище капілярності. Форма поверхні такої краплі описується рівнянням Лапласа [4]:

$$\gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = g(\rho_2 - \rho_1)z + C, \quad (1)$$

де  $z$  – координата в напрямку сили земного тяжіння;  $\rho_1$  і  $\rho_2$  – густини середовищ, які розділяє викривлена поверхня;  $\gamma$  – поверхневий натяг вільної поверхні краплі;  $R_1$  – радіус кривизни в площині рисунка;  $R_2$  – радіус кривизни в площині перпендикулярній до площини рисунка;  $C$  – стала, яка залежить від вибору початку координат (рис. 1).

Це рівняння описує безліч можливих крапель, які мають вільну біля полюса поверхню. При виготовленні мікролінз нас цікавлять умови утворення тільки тих крапель, які за формою наближені до сферичного сегмента. Якщо підібрати вихідні матеріали з низьким хімічним усадженням, то затверділі та рідкі краплі будуть мало відрізнятися за формою і лінійними розмірами [5]. Тому, забезпечивши сферичну форму краплі і заполімеризувавши її, ми можемо отримати лінзу із сферичною кривизною поверхні. При цьому, форма краплі, яка утворюється на горизонтальній основі, залежить від природи рідини (поверхневої енергії і густини), якості поверхні підкладки (шорсткості), а також від об'єму рідини і контактного кута, який утворює рідина на цій поверхні.

Критерієм сферичності крапель ми вибрали різницю об'ємів краплі і еквівалентного сферичного сегмента. Під еквівалентним сферичним сегментом розуміється сегмент, висота  $h$  і радіус основи  $r$  якого дорівнюють відповідним параметрам краплі. Об'єм краплі  $V_{кр}$  розраховувався за точним співвідношенням, отриманим Пуассоном [4]:

$$V_{кр} = \frac{\pi R_o^2 r^2}{\beta} \left( \frac{2}{R_o} - \frac{2 \sin \theta}{r} + \frac{\beta h}{R_o^2} \right), \quad (2)$$

де  $\beta = R_o^2 / a^2$  – параметр форми краплі;  $a$  – капілярна стала;  $R_o$  – радіус у полюсній точці;  $\theta$  – контактний кут.

А об'єм еквівалентного сегмента розраховувався за формулою [6]

$$V_{се} = \frac{1}{6} \pi h (3r^2 + h^2). \quad (3)$$

Для розрахунку об'ємів необхідно визначити  $r$ ,  $h$  за допомогою рівняння Лапласа. Оскільки рівняння Лапласа не має точного аналітичного розв'язку, то воно замінювалося системою диференціальних рівнянь [4]:

$$\begin{cases} \frac{dx'}{d\theta} = \frac{\cos\theta}{z'\beta + 2 - \frac{\sin\theta}{x'}} \\ \frac{dz'}{d\theta} = \frac{\sin\theta}{z'\beta + 2 - \frac{\sin\theta}{x'}} \end{cases} \quad (4)$$

де  $x' = \frac{x}{R_o}$ ,  $z' = \frac{z}{R_o}$  – координати контура крапель;  $\theta$  – змінна інтегрування.

Розв'язавши систему рівнянь (4) методом Рунге–Кутта четвертого порядку точності з початковими умовами  $x'=0$ ,  $z'=0$ ,  $\theta=0$ ,  $dx'/d\theta=1$ ,  $dz'/d\theta=0$  при заданих значеннях  $R_o$  і  $\beta$ , ми отримали координати  $xz$  точок, в яких дотичні до контура кривизни краплі мають кут нахилу  $\theta$ . За цими координатами розраховувались  $r$ ,  $h$ , а звідси і об'єми крапель та відповідних еквівалентних сегментів з контактним кутом  $\theta$  при різних  $R_o$  і  $\beta$ .

Тестування мікролінз проводилося за їх профільними знімками, які отримувалися за допомогою оптико-цифрової системи [7]. Растрові зображення мікролінз оброблялися згідно із створеними алгоритмами [8]. В результаті визначались координати  $x_j$  і  $z_j$  контура мікролінзи і розраховувались радіуси кривизни мікролінзи  $R_{1j}$ ,  $R_{2j}$  і коефіцієнт форми  $\beta_j$  за відповідними формулами

$$R_{1j} = \frac{[1 + (f(j)')^2]^{3/2}}{f(j)''}, \quad (5)$$

$$R_{2j} = \frac{x_j}{\sin\theta_j}, \quad (6)$$

$$\beta_j = \frac{R_o \left( \frac{R_o}{R_{1j}} + \frac{R_o}{R_{2j}} - 2 \right)}{z_j}, \quad (7)$$

де  $f(j)$  – багаточлен, отриманий під час апроксимації координат  $x_j$  і  $z_j$  ( $j=0..n$ );  $n$  – кількість експериментальних точок на контурі мікролінзи;  $\theta_j$  – кут нахилу дотичної до контура;  $R_o$  – радіус кривизни мікролінзи в омболічній точці (найвищій точці контура).

Отже, такі розрахунки дають необхідну інформацію про форму мікролінзи. А саме:

середнє значення коефіцієнта  $\beta$  ( $\beta = \frac{\sum \beta_j}{n}$ ) та необхідні величини для дослідження за-

лежності  $V_{мл} = f(R_{мл})$  (де  $R_{мл}$  – середнє значення радіуса кривизни  $R_{1j}$ ,  $R_{мл} = \frac{\sum R_{1j}}{n}$ ;  $V_{мл}$  – об'єм мікролінзи, розрахований за формулою (3)).

**Результати та їх обговорення.** Теоретичні залежності зведених об'ємів краплі  $V_{кр}/R_o^3$  і кульового сегмента  $V_{сег}/R_o^3$  від контактного кута  $\theta$  показані на рис. 2.

Як бачимо, об'єм краплі не відрізняється від об'єму сферичного сегмента для  $\beta = 0,1$  і практично не відрізняється від сегмента для  $\beta \leq 1$  при  $\theta < 60^\circ$ ,  $\beta \leq 4$  і  $\theta < 50$  або  $\beta \leq 9$  і  $\theta < 40$ . Іншими словами, для рідин з малою капілярною сталою, яка характерна для полімерів і малих крапель, можна знехтувати впливом сили земного тяжіння, що проявляється у сферичній формі краплі.

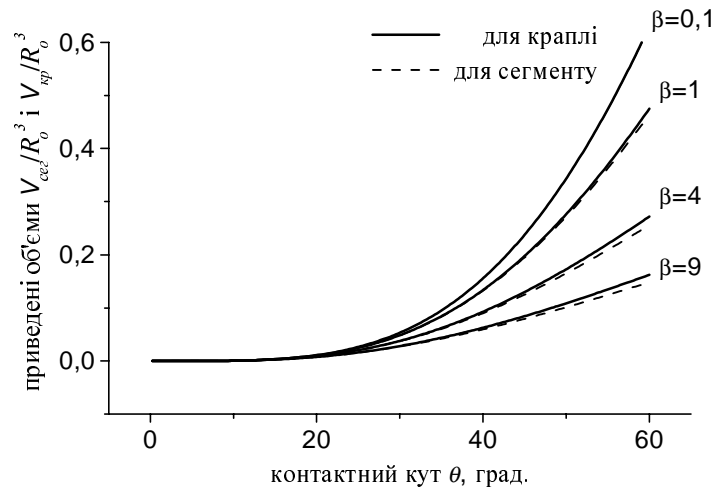


Рис. 2. Залежність зведених об'ємів крапель і сферичних сегментів від контактного кута  $\theta$

У таблиці наведені окремі результати тестування параметрів  $R_{мл}$ ,  $\theta$ ,  $\beta$ ,  $V_{мл}$  виготовлених мікролінз, які сформовані з мономерної композиції на основі епоксиакрилату (АКЕД/ДМАМ) і пробної композиції №2, та розраховані співвідношення  $V_{мл}/R_{мл}^3$ .

#### Результати тестування параметрів $R_{мл}$ , $\theta$ , $\beta$ , $V_{мл}$ лінз

Композиція	Скляна підкладка								
	Покрита гліцерином								
	АКЕД/ДМАМ			композиція №2			АКЕД/ДМАМ		
$R_{мл}$ (мм)	1,5	2,05	2,13	2,58	2,78	2,96	2,02	3,36	4,72
$\theta$ , (град)	60°	61°	60,5°	63	61	63	40°	43°	45°
$\beta$	0,9	1	0,8	0,8	1	0,5	2,5	2,00	2,5
$V_{мл}$ (мм <sup>3</sup> )	1,9	5,6	6,2	13,4	13,3	20,9	1	8,3	19
$V_{мл}/R_{мл}^3$	0,55	0,60	0,61	0,77	0,62	0,8	0,13	0,21	0,18

Як бачимо, на скляній підкладці з нанесеним шаром гліцерину, утворюються подібні краплі. Вони мають сферичну форму поверхні ( $\beta \leq 1$ ) і практично сталий контактний кут  $\theta \sim 60^\circ$ , що добре узгоджується з теоретичними розрахунками. Контури цих мікролінз в пікселях показані на рис. 3 (1 пікс=13 мкм). Вони наочно підтверджують, що контактний кут не залежить від об'єму краплі, засвідчуючи цілковиту подібність крапель (мікролінз) і однорідність поверхні підкладки з нанесеним гліцерином.

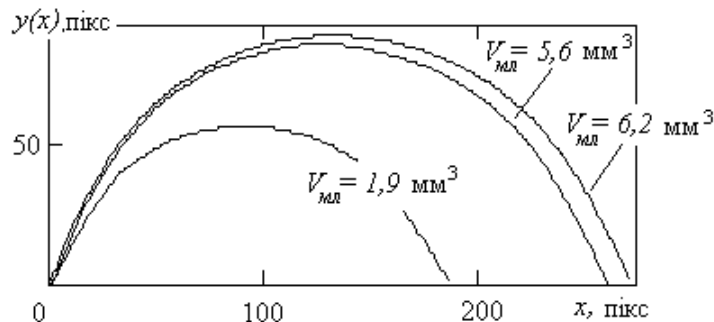


Рис. 3. Контури мікролінз, які виготовлено з різних об'ємів композиції АКЕД/ДМАМ на скляній підкладці, покритій гліцерином

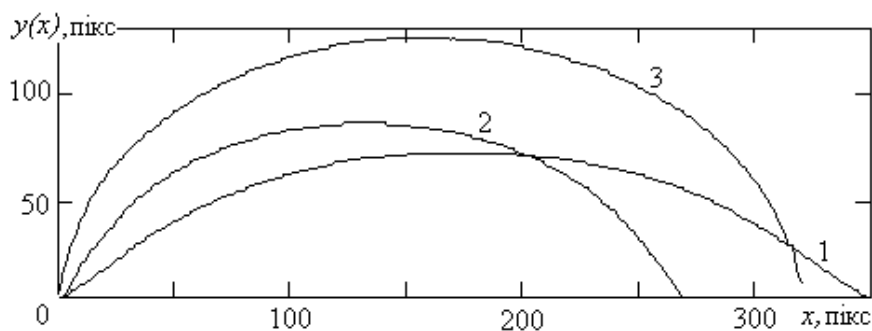


Рис. 4. Контури мікролінз різної форми

Інші отримані результати доводять, що на чистому склі утворюються сферичні ( $\beta=2\div 2,5$  при кутах  $\theta \leq 45^\circ$ ), але не подібні краплі, тому що змінюється контактний кут (таблиця), що викликано впливом шорсткості поверхні підкладки (неоднорідністю підкладки).

Проте контактний кут залежить від відношення поверхневих натягів полімер-підкладка і полімер-повітря, тому мікролінзи, виготовлені з різних композицій на різних підкладках, мають різну форму. На рис. 4 показано такий результат, де на одному координатному полі зображені контури профілів різних за формою мікролінз. Зразок 1 виготовлено з композиції АКЕД/ДМАМ ( $V=8,3\text{мм}^3$ ) на скляній підкладці, зразок 2 виготовлено також з композиції АКЕД/ДМАМ ( $V=6,2\text{мм}^3$ ) на скляній підкладці, покритій гліцерином, зразок 3 сформовано з пробної композиції №2 ( $V=13,4\text{мм}^3$ ) на скляній підкладці з шаром гліцерину.

За отриманими результатами тестування параметрів  $R$  і  $V$ , які показано на рис. 5, досліджувалась залежність радіуса кривизни мікролінзи від її об'єму.

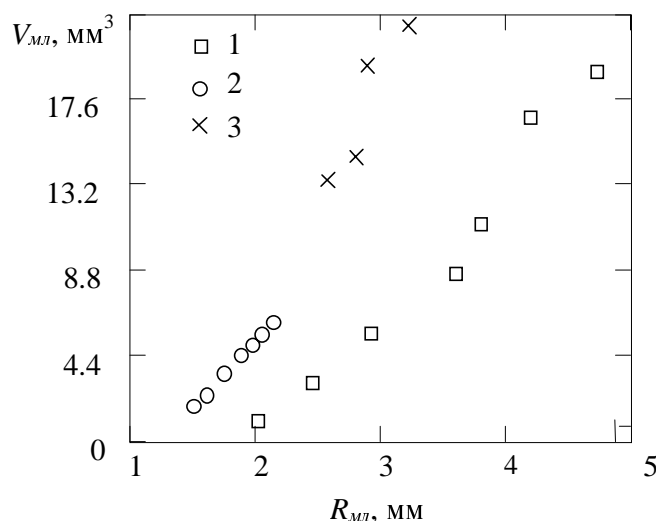


Рис. 5. Результати взаємозв'язку радіуса кривизни і об'єму мікролінз

Як бачимо, для мікролінз, виготовлених з композиції АКЕД/ДМАМ на скляній підкладці, покритій гліцерином (результат 2), спостерігається чітка, з максимальним коефіцієнтом кореляції, лінійна залежність, яка має такий аналітичний вираз:

$$V_{мл} = 7R_{мл} - 8,5. \quad (8)$$

Емпіричне рівняння (8) описує форму та розміри мікролінз, виготовлених з крапель, які відповідають рівнянню (2) при визначених умовах.

Для мікролінз, виготовлених з композиції *АКЕД/ДМАМ* на скляній підкладці (результат 1), залежність  $V_m=f(R_{ml})$  має складніший характер (лінійна апроксимація проводиться з коефіцієнтом кореляції 0,9), хоча в діапазоні об'ємів 1–8 мм<sup>3</sup> вона строго лінійна. Про результат 3 (мікролінзи виготовлені з пробної композиції №2 на скляній підкладці, покритій гліцерином) конкретних висновків зробити не можемо, оскільки ця рідина нами не достатньо вивчена.

Отже, дослідивши умови формування сферичних і подібних крапель, з яких виготовляються мікролінзи, констатуємо про можливість використання об'єму рідини для контролю заданого радіуса кривизни мікролінзи.

**Висновки.** У цій роботі описана послідовність операцій, необхідних для виготовлення мікролінз фотополімеризацією лежачої краплі. Використовуючи теорію капілярності, теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено можливість утворення мікролінз із сферичною формою поверхні. Результати тестування виготовлених елементів дали змогу отримати наближену аналітичну залежність радіуса кривизни від об'єму фотополімера (припустимо, що форма і розміри рідких і затверділих крапель дуже не відрізняються) для композиції *АКЕД/ДМАМ* і скляної підкладки з поверхневим шаром гліцерину, що, очевидно, дає можливість легко реалізувати запропонований спосіб у вивченому діапазоні об'ємів.

1. Hamblen D.P.//US Patent. 1977. 4,022,855. 2. Hamblen D. P. // *Applied Optics*, 1994. – 4. – P. 561–564. 3. Zissi S., Corbel S., Jezequel J.Y., Ballandras S. and Andre J.C. // *Microchemistri. Spectroscopy and Chemistri in Small Domains*, 1994. – P. 65–78. 4. Іващенко Ю.М., Єременко В.Н. *Основи прецизійного вимірювання поверхневої енергії розплавів за методом лежачої краплі.* – К., 1972. 5. Hamblen D.P et al // *US Patent*. 1992. – 5. – P. 143,659. 6. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. *Справочник по математике.* – М., 1964. 7. Муравський Л.І, Бачевський П.С., Вороняк Т.І. // *Фіз-хім механіка матеріалів*. 1997. – 5. – С. 81–87. 8. Бобицький Я.В., Лаба Г.П., Максименко О.П. // *Відбір і обробка інформації*, 2000. – 14(90). – С. 130–133.