

УДК 535.241.5

Є. Є. Антонов

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Алгоритм розрахунку параметрів кільцевих фокусуєчих мікропризмових структур

Запропоновано алгоритм розрахунків параметрів мікропризмових елементів для фокусування оптичних зображень і створення датчиків біосенсорних систем. Виконано розрахунки залежності кута заломлення мікропризм від радіуса кільцевих заломлюючих структур для варіантів постійного кроку мікрорельєфу та постійної його глибини. Проведено аналіз шляхів поліпшення оптичних характеристик шляхом використання рефракційно-дифракційних структур.

Ключові слова: мікропризмовий елемент, крок рельєфу, кут заломлення, коефіцієнт відбиття, дифракція світла, хроматизм.

Кільцеві фокусуєчі лінзи Френеля, які широко застосовуються в прикладній оптиці, складаються з сукупності концентричних кільцевих плоско-випуклих ахроматичних лінз, що примикають одна до одної та мають спільний фокус F [1]. Схему такої лінзи наведено на рис. 1. Розроблено численні методи розрахунків таких рефракційних структур [2]. Однак аналогічні мікропризмові структури з плоскими кільцевими поверхнями менш відомі, можливо це пов'язано з труднощами виготовлення високоточних оптичних поверхонь з малим кроком $W = 0,3\text{--}0,6$ мм.

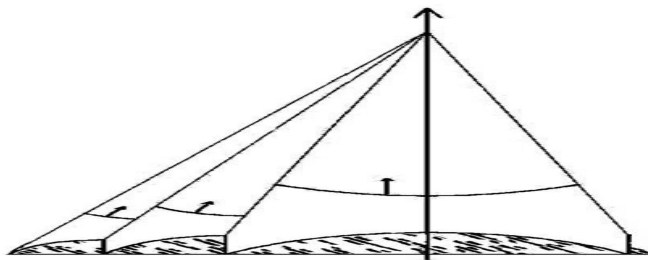


Рис. 1. Схема лінзи Френеля з кільцевих плоско-випуклих тонких ахроматичних лінз [1]

Для створення датчиків біосенсорних систем, що функціонують на принципі збудження поверхневих плазмонних хвиль зі скануванням кута резонансу [3], також необхідні мікропризмові структури зі змінним кутом заломлення мікропризм. При використанні таких структур сканування зміни кута збудження поверхневого плазмонного резонансу замінюється простим електронним зчитуванням множини даних з відповідної групи мікропризм, що значно скорочує час діагностики. Основною вимогою до таких кільцевих структур є визначена залежність кута нахилу робочої поверхні мікропризми від радіуса. Формування рельєфу на поверхні може бути здійснено на будь-якому законі залежності кута нахилу від радіуса, але можливим є створення кільцевих структур на принципі фокусування зображень. Тому існує потреба в прикладних розрахунках параметрів таких структур, які необхідні для виготовлення заломлюючих мікропризмових кільцевих лінз різного призначення.

Алгоритм розрахунків структур з постійним кроком рельєфу

Існують два варіанти кільцевих мікропризмових фокусуєчих структур: 1) з постійним кроком W мікрорельєфу; 2) з постійною глибиною H . Розрахунок фокусуєчих лінз з постійним кроком рельєфу полягає в тому, що замість однієї рефракційної лінзи використовується структура у вигляді тонких плоских кілець трикутного профілю в перерізі однакової ширини W , які заломлюють паралельні світлові промені в точку спільного фокуса F . Схему такої структури наведено на рис. 2. При розрахунках рельєфу для обох варіантів зворотний кут β мікропризм [4] встановлюють або нульовим, або мінімально необхідним для технологій практичного виготовлення таких структур. На першому етапі для визначення основних параметрів таких структур можливо використовувати принципи геометричної оптики, але для визначення точних характеристик необхідно використовувати більш складні моделі, тому що дифракційні ефекти істотно впливають на кутові характеристики заломлених променів.

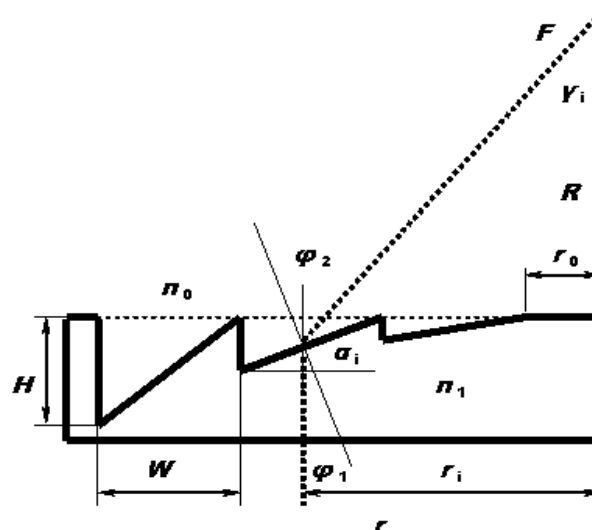


Рис. 2. Схема кільцевого мікропризмового елемента Френеля для варіанта незмінного кроку рельєфу з прямим ходом променя

Будемо вважати, що мікропризмона структура з плоскими кільцевими прозорими оптичними поверхнями ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) виготовлена з матеріалу з коефіцієнтом заломлення n_1 та розміщена в середовищі з коефіцієнтом заломлення n_0 . Структура сформована таким чином, що промені світла від кожної кільцевої зони N_i шириною W , що розташована на відстані r_i від центра та нахилена під кутом α_i до утворюючої поверхні, збираються в точці фокуса F , відстань якої від утворюючої поверхні мікропризмонаї структури становить R . У центрі структури може бути сформована плоска зона радіусом r_0 , наявність якої доцільна чисто з технологічних міркувань для спрощення виготовлення таких структур, наприклад, методом алмазного різання [4]. Звичайно, що при розрахунках величина r_0 може бути і нульовою. Будемо також вважати, що крок рельєфу W досить малий порівняно з величиною фокуса F , тому кожний кільцевий елемент, який відповідає певній кількості кроків рельєфу N_i , спостерігається з точки фокусування під одним і тим же кутом γ_i .

Метою розрахунків для варіанта постійного кроку рельєфу є отримання залежності кута нахилу α_i кожної кільцевої зони від радіуса r_i відповідної зони, який будемо задавати величиною плоскої центральної зони радіусом r_0 та кількістю кроків рельєфу N_i , тобто

$$r_i = r_0 + W N_i, \quad (1)$$

де W — крок рельєфу. Враховуючи, що

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \gamma_i, \quad (2)$$

де кут спостереження $\gamma_i = \text{tg}^{-1}(r_i/R)$, а величини φ_1 та φ_2 — кути розповсюдження променя в першому та другому середовищах, то співвідношення між кутом відхилення γ і кутом заломлення мікропризми $\alpha = \varphi_1$ можна визначити з закону Снелліуса [5]:

$$n_1 \sin \alpha = n_0 \sin(\alpha + \gamma). \quad (3)$$

Використовуючи співвідношення $\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta$ залежність (3) зручно записати у вигляді:

$$n_1 \text{tg} \alpha = n_0 \{ \sin \gamma + \text{tg} \alpha \cos \gamma \}. \quad (4)$$

Звідси для випадку знаходження мікропризми, що виготовлена з поліметилметакрилату ($n_1 = 1,491$), в повітрі ($n_0 = 1,0$) можна отримати кінцевий вираз для кута заломлення мікропризм для кожного кроку рельєфу i :

$$\alpha_i = \text{tg}^{-1} \{ \sin \gamma_i / (1,491 - \cos \gamma_i) \}. \quad (5)$$

Для створення фокусуєчих структур, для яких джерело освітлення знаходиться зі зворотної сторони мікрорельєфу (рис. 3), для варіанта постійного кроку рельєфу W кінцевий вираз для кута заломлення α_i залежно від кількості кроків ре-

льєфу N_i має такий вигляд:

$$\alpha_i = \text{tg}^{-1} \{ (n_1/n_0) \sin \xi_i \{ (n_1/n_0) \cos \xi_i - 1 \}^{-1} \}, \quad (6)$$

де величина $\xi_i = \sin^{-1} \{ (n_0/n_1) \sin \gamma_i \}$, кут спостереження $\gamma_i = \text{tg}^{-1}(r_i / R)$, радіус $r_i = r_0 + W N_i$.

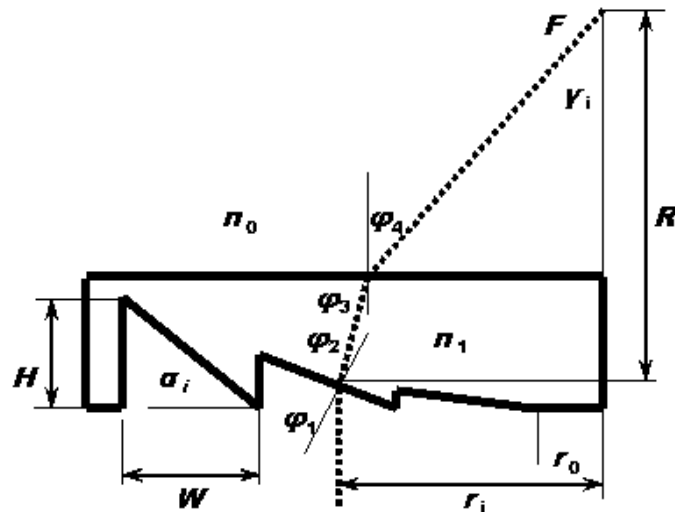


Рис. 3. Схема кільцевого мікропризмового елемента Френеля для варіанта незмінного кроку рельєфу зі зворотним ходом променя

Результати розрахунків параметрів рельєфу

Приклад результатів розрахунків згідно (5) кутів рельєфу мікропризмових структур з прямим ходом променя для варіанта постійного кроку рельєфу наведено на рис. 4 для декількох значень кроку рельєфу W для фокуса $F = 150$ та 300 мм і радіуса $r_0 = 0,5$ мм.

На рис. 5 наведено ілюстративний приклад результатів розрахунків кутів кільцевої структури для фокуса $F = 150$ мм і кроку $W = 0,3$ та $1,5$ мм. Відмітимо, поперше, що кут заломлення призми для певного радіуса r_i кільцевої структури не залежить від кроку W . По-друге, при виготовленні прецизійних мікрорельєфних структур необхідно враховувати відбиття променів від поверхні, тому кути нахилу α_i не повинні перевищувати $40\text{--}45^\circ$, при яких таке відбиття стає істотним. Для ілюстрації на рис. 5 (крива 2) наведено коефіцієнт відбиття k_F , який було визначено за формулами Френеля [6].

Відзначимо, що при виготовленні прецизійних мікрорельєфних структур з строго визначеними параметрами рельєфу необхідно використовувати лише точні дані з відповідних таблиць розрахунків, що забезпечує необхідну точність формування кутів мікропризм. Приклад таких даних для режиму, що відображений на рис. 5, наведено в таблиці для перших декількох кроків N_i мікрорельєфу.

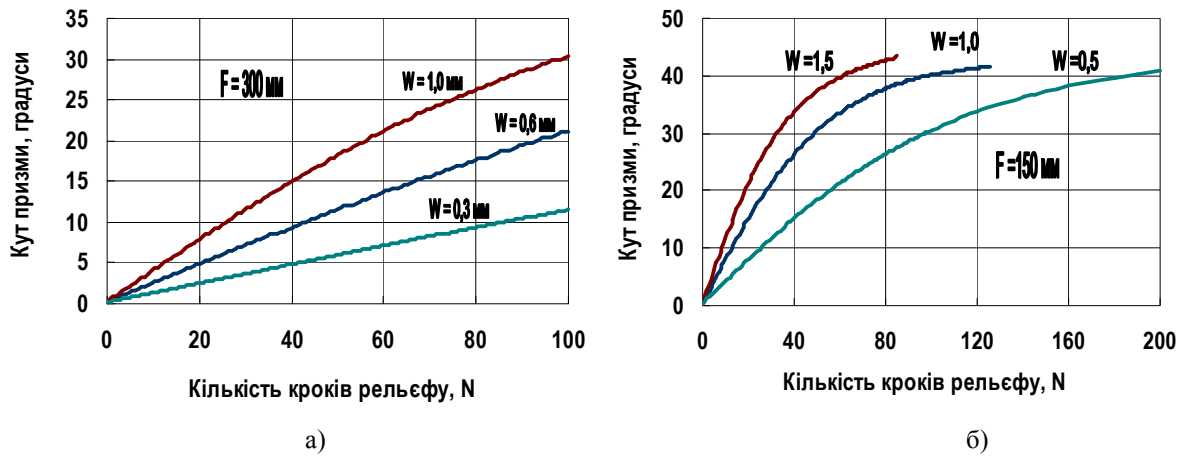


Рис. 4. Залежність кута нахилу граней від кількості N зон кільцевої структури Френеля з постійним кроком рельєфу W : а) фокус $F = 300$ мм; б) фокус $F = 150$ мм

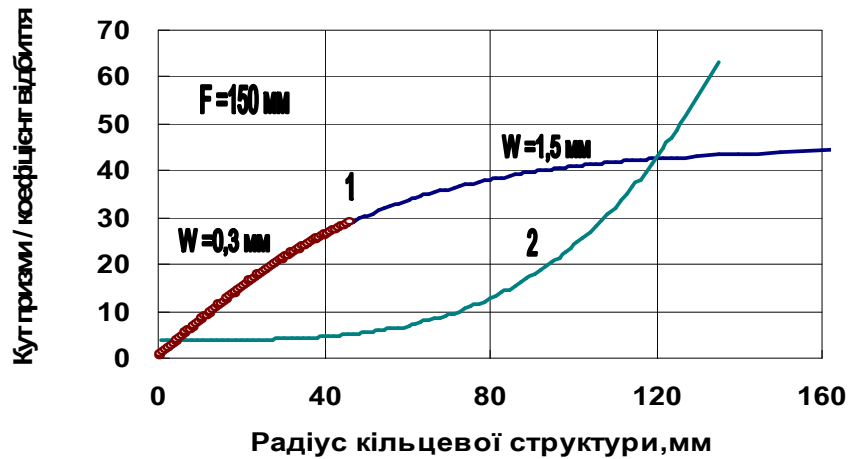


Рис. 5. Залежність кута нахилу граней від радіуса кільцевої структури Френеля з постійним кроком рельєфу: фокус $F = 150$ мм, крок $W = 0,3-1,5$ мм.
 1 — кут призми α_i (градуси); 2 — коефіцієнт відбиття k_F (%)

Приклад результатів розрахунків згідно (6) кутів мікропризмового рельєфу з зворотним ходом променя для випадку знаходження мікропризми, що виготовлена з поліметилметакрилату ($n_1 = 1,491$), в повітрі ($n_0 = 1,0$) для кроку рельєфу $W = 0,6$ та $1,5$ мм і фокусної відстані $F = 150-300$ мм наведено на рис. 6 (крива 1). Криві 2 на рис. 6 відображають аналогічні дані для варіанта прямого ходу променя.

Параметри мікрорельєфу кільцевої фокусуєчої структури (фрагмент)

N	W = 1,5 mm, F = 150 mm				
	$r = r_0 + N W$	$\gamma = \text{tg}^{-1}(r / R)$		$\alpha = \varphi_1 = \text{tg}^{-1} [\sin \gamma / (1,491 - \cos \gamma)]$	
	$r_0 = 0,5$	радиани	градуси	радиани	градуси
0	0,5	0,00333	0,19099	0,00678865	0,38896
1	2	0,01333	0,76390	0,02714147	1,55509
2	3,5	0,02333	1,33666	0,04744719	2,71852
3	5	0,03332	1,90915	0,06767090	3,87726
4	6,5	0,04331	2,48126	0,08777843	5,02933
5	8	0,05328	3,05288	0,10773660	6,17285
6	9,5	0,06325	3,62389	0,12751348	7,30598
7	11	0,07320	4,19418	0,14707866	8,42699
8	12,5	0,08314	4,76364	0,16640341	9,53421
9	14	0,09306	5,33216	0,18546091	10,62613
10	15,5	0,10297	5,89963	0,20422638	11,70131
11	17	0,11285	6,46593	0,22267715	12,75846
12	18,5	0,12271	7,03097	0,24079281	13,79641
13	20	0,13255	7,59464	0,25855517	14,81412
14	21,5	0,14236	8,15684	0,27594834	15,81068
15	23	0,15215	8,71746	0,29295867	16,78530
16	24,5	0,16190	9,27640	0,30957471	17,73732
17	26	0,17163	9,83356	0,32578716	18,66623
18	27,5	0,18132	10,38886	0,34158878	19,57160
19	29	0,19098	10,94219	0,35697427	20,45312
20	30,5	0,20060	11,49345	0,37194017	21,31060
21	32	0,21018	12,04258	0,38648476	22,14395

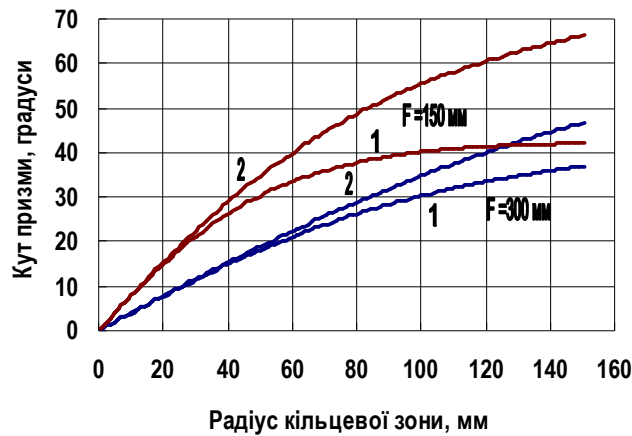


Рис. 6. Залежність кута нахилу граней від радіуса кільцевої структури Френеля з постійним кроком рельєфу: фокус $F = 150\text{--}300$ мм: 1 — зворотний хід променя; 2 — прямий хід променя

Порівняння кривих 1, 2 на рис. 6 свідчить, що залежність кута призми від радіуса для варіанта зворотного ходу променя більш лінійна порівняно з варіантом прямого ходу, але розрахункові значення кутів заломлення при цьому значно

більші для великих значень $r_i > 40\text{--}45$ мм, тому цей варіант, по-перше, менш ефективний внаслідок великих коефіцієнтів k_F відбиття світла від поверхні, по-друге, менш технологічний для формування мікрорельєфу, наприклад, методом алмазного різання [4].

Фокусуючі структури з постійною глибиною рельєфу

Для ряду застосувань більш сприятлива структура мікрорельєфу з незмінною глибиною рельєфу H . Відповідну схему елемента наведено на рис. 7. Для цього випадку метою розрахунків є отримання залежності ширини кільцевої зони $\Delta r_i = (r_i - r_{i+1})$ та кута φ_i кожної трикутної кільцевої зони від радіуса r_i , на якому розміщується ця зона. Аналогічно першому випадку будемо вважати, що відстань до точки фокуса R досить велика порівняно з кроком рельєфу, тому величина $R \gg \Delta r_i = (r_i - r_{i+1})$, і кожна кільцева зона має один і той же кут спостереження γ_i .

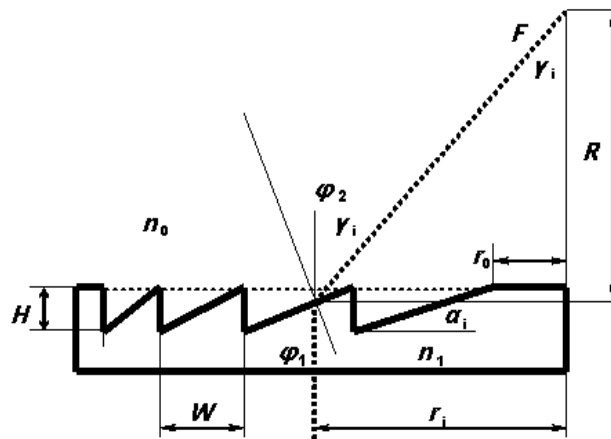


Рис. 7. Схема кільцевого мікропризмного елемента Френеля з незмінною глибиною рельєфу

Алгоритм розрахунків дещо схожий на варіант постійного кроку рельєфу. На першому етапі розраховується кут γ_1 для першої зони та знаходиться значення кута нахилу першої нахиленої кільцевої площадки φ_1 та відповідного радіуса r_1 :

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \text{tg}^{-1}(r_0 / R), \\ \varphi_1 &= \text{tg}^{-1} \{ \sin \gamma_1 / (1,491 - \cos \gamma_1) \}, \\ r_1 &= H / \text{tg} \varphi_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Після цього аналогічно розраховуються параметри рельєфу для зон рельєфу $i = 2, 3, 4, \dots$, причому на кожному з етапів попередні дані становляться початковими даними комп'ютерних розрахунків для наступного етапу, що дозволяє отримати параметри рельєфу (радіуси кільцевих зон r_i та відповідні кути нахилу граней φ_i) для будь-яких значень r_0 , R , H , та кількості кроків N_i . Деякі з результатів для одного з режимів наведено на рис. 8.

Результати розрахунків профілю мікрорельєфу для випадку незмінної глибини рельєфу наведено на рис. 9, 10. Відзначимо, що зображення на рис. 9 не є фотографією і не відображає структуру мікрорельєфа в реальному масштабі. Масштаби зображення даних по осі X та осі Y відрізняються майже в 5 разів і вибрані такими, щоб показати характер зміни структури рельєфу для якомога більше кроків мікрорельєфу. Фрагмент більш-менш реального профілю рельєфу, що ілюструється рис. 9, для діапазону зміни радіуса $r_i = 10\text{--}11$ мм наведений на рис. 10. Точні же значення кутів і радіусів рельєфу можна отримати лише з відповідних таблиць розрахунків, аналогічних у наведеній таблиці.

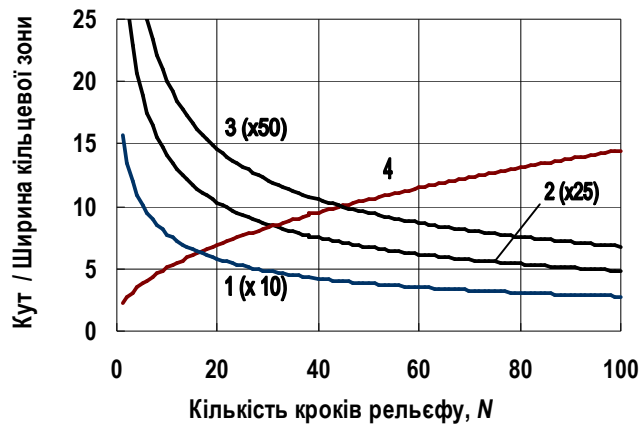


Рис. 8. Ширина кільцевої зони ($r_i - r_{i+1}$) структури Френеля з незмінною глибиною рельєфу для $R = 300$ мм залежно від кількості кроків N_i : 1 — глибина $H = 0,100$ мм; 2 — $H = 0,050$ мм; 3 — $H = 0,025$ мм; 4 — кут заломлення мікропризм α_i (градуси) для $H = 0,050$ мм

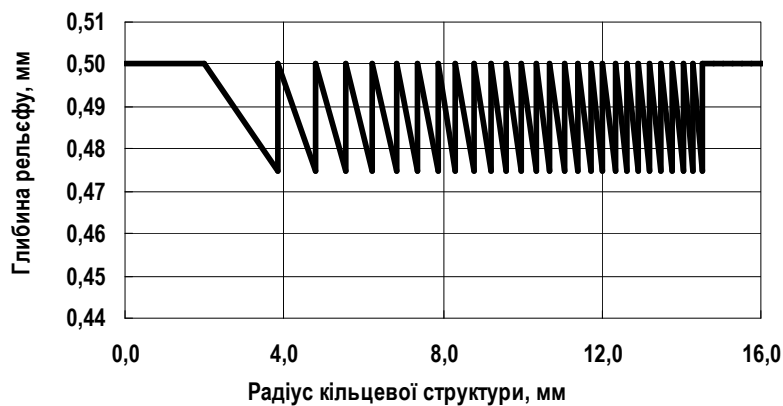


Рис. 9. Розрахунковий профіль фокусуєчого рельєфу мікропризмової структури Френеля для $R = 300$ мм: глибина рельєфу $H = 0,025$ мм; радіус $r_0 = 2,0$ мм, товщина утворюючої пластинки $\delta = 0,5$ мм

Запропоновані алгоритми розрахунків розроблено на базі принципу фокусування паралельних кільцевих пучків світла в точку фокуса. Однак, вирази (5)–(7)

дозволяють розраховувати і одномірні мікропризмові структури з трикутним перерізом профілю рельєфу, який характерний для оптичних компенсаторів косокутності Френеля [4].

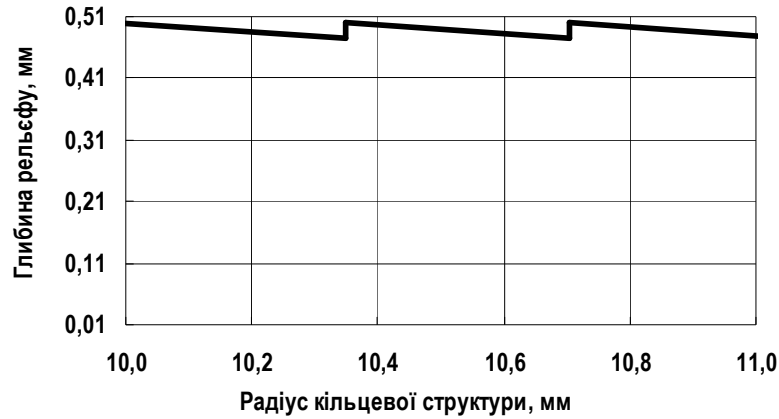


Рис. 10. Фрагмент профілю фокусуєчого рельєфу мікропризмової структури Френеля: $R = 300$ мм; $r = 10\text{--}11$ мм; глибина рельєфу $H = 0,025$ мм

Мікропризмові структури для біосенсорних датчиків розраховуються аналогічним чином, однак зворотний кут β мікропризмового рельєфу в цьому випадку встановлюється досить великим порівняно з кутами заломлення призми. На рис. 11 зображено розрахований профіль такої структури з незмінною зворотною зоною $r_\beta = 0,08$ мм і зворотним кутом мікропризм $\beta \approx 72,6^\circ$, який достатній для того, щоб заломлений промінь після відбиття від утворюючої поверхні вийшов зсередини призми.

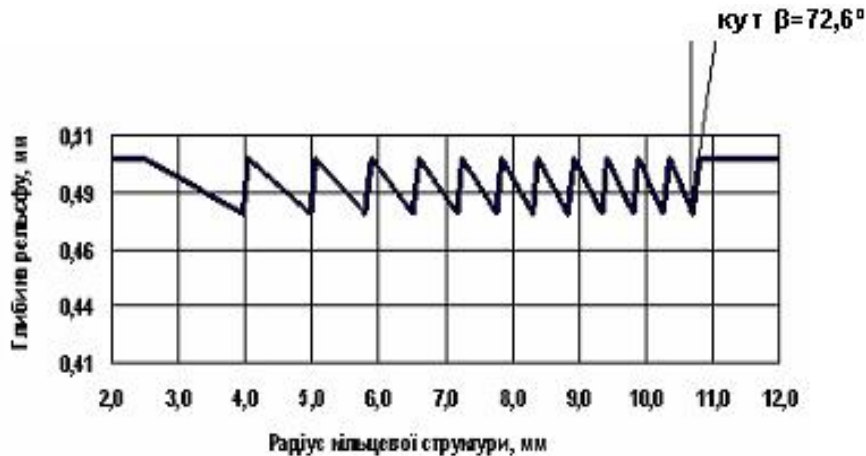


Рис. 11. Профіль рельєфу мікропризмової структури для біосенсорних датчиків: $R = 300$ мм, глибина $H = 0,025$ мм; радіус $r_0 = 2,5$ мм, зворотна зона $\Delta r = 0,08$ мм, товщина утворюючої пластинки $\delta = 0,5$ мм

Зазначимо, що дискретність сканування кута збудження поверхневого плазмонного резонансу на 2–3 порядки перевищує саме абсолютне значення цього ку-

та. Тому для виготовлення мікропризмових структур для датчиків біосенсорних систем важливо мати можливість отримувати параметри рельєфу з максимальною точністю та максимально малим кроком зміни кутів $\Delta\alpha_i$ нахилу кільцевих граней для діапазону кутів α_i , який відповідає області збудження зазначеного резонансу.

Запропоновані мікропризмові фокууючі кільцеві структури мають певний недолік порівняно з ахроматизованими плоско-випуклими рефракційними лінзами Френеля [1], який полягає в погіршенні якості отриманих зображень внаслідок хроматичних явищ, що притаманні будь-якій призмовій структурі. Для ахроматизації кільцевих мікропризмових структур можливо використати метод так званих гризм — комбінованих рефракційно-дифракційних структур з різними кроками рельєфу — великим і малим, що запропонований авторами [6] для оптичних компенсаторів косоокості [4]. Наприклад, використання на кільцевій мікропризмовій структурі з кроком $W_1 = 1500$ мкм додаткової захисної мікрорельєфної поверхні з кроком $W_2 = 15\text{--}20$ мкм і глибиною малого рельєфу $H = 1,0\text{--}1,1$ мкм повністю компенсує хроматичні явища для зеленого світлового діапазону з довжиною хвилі $\lambda = 555$ нм та істотно зменшить зону хроматизму для синього та червоного діапазонів спектра.

Висновки

Запропоновано алгоритм розрахунків характеристик мікрорельєфу кільцевих призмових структур Френеля для фокусування зображень і створення датчиків біосенсорних систем, який дозволяє отримувати необхідні параметри мікрорельєфу залежно від радіуса для варіантів незмінного кроку рельєфу або незмінної глибини для будь-якої фокусної відстані та діаметра кільцевої структури, а також розраховувати оптичні характеристики одномірних мікропризмових структур з трикутним перерізом профілю рельєфу.

1. Стаценко Т.В. Пространственно-временное преобразование ультракороткого импульса линзой Френеля / Т.В. Стаценко, Ю.А. Толмачев, И.А. Шевкунов // Наносистемы: физика, химия, математика. — 2011. — Т. 2, № 1. — С. 101–108.

2. Бобров С.Т. Оптика дифракционных элементов и систем / С.Т. Бобров, Г.И. Грейсух, Ю.Г. Туркевич. — Л.: Машиностроение, 1986. — 223 с.

3. Войтович И.Д. В.М.Сенсоры на основе плазмонного резонанса: принципы, технологии, применения / И.Д. Войтович, В.М. Корсунский. — К., 2011. — 532 с.

4. Петров В.В. Хроматизм світла, дифракція та гострота зору в мікропризмових лінзах Френеля / В.В. Петров, Є.Є. Антонов, С.М. Шанойло // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2010. — Т. 12, № 1. — С. 49–54.

5. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. — М.: Наука, 1973. — 720 с.

6. Шляхи поліпшення оптичних характеристик мікропризмових структур / В.В. Петров, С.М. Шанойло, Є.Є. Антонов, А.С. Лапчук // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2010. — Т. 12, № 2. — С. 25–33.

Надійшла до редакції 10.05.2012