

УДК 617.751

DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2026.2\(50\).116-124](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2026.2(50).116-124)

В. В. ПЕТРОВ, академік НАН України
доктор технічних наук, професор
<http://orcid.org/0000-0002-7265-9889>

Є. Є. АНТОНОВ, доктор технічних наук
старший науковий співробітник
<http://orcid.org/0000-0003-4471-8287>

В. М. ЗЕНІН, науковий співробітник
<http://orcid.org/0009-0005-16653-9743>

В. Є. МІЛЕВСЬКИЙ
провідний інженер-конструктор
<https://orcid.org/0009-0006-4706-8143>
(Інститут проблем реєстрації інформації
Національної академії наук України,
м. Київ)

МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ ПЛОСКО-ФОКУСУВАЛЬНОЇ ОПТИКИ

Розроблено алгоритм розрахунків спеціалізованої плоско-фокусувальної оптики зі зменшеними світловими діаметрами, яка призначена для збільшення приймальної площі фотодетектора при збереженні кутів огляду для використання в автоматизованих системах стеження за рухомими об'єктами. Виконано комплекс розрахунків геометричних параметрів такої оптики. На основі розрахунків методом алмазного лезового мікроточіння сформовано тестові зразки зазначених лінз нової серії. Методом лазерної діагностики досліджено оптичні параметри створених лінз. Отримані результати дозволили оптимізувати параметри трансформуючої оптики і створити плоско-фокусувальні лінзи, найбільш придатні для практичного використання в системах стеження.

Ключові слова: геометричні параметри лінз, кільцеві фокусуєчі структури, лазерна діагностика мікропризмової оптики.

ВСТУП

Для ряду застосувань, зокрема в реальних системах з чотириплощинними фотодетекторами для автоматичного стеження за рухомими об'єктами, необхідні лінзи зі світловим діаметром, зменшеним до значення $D_S = 21$ мм. Такі так звані плоско-фокусувальні лінзи мають формувати в фокальній площині гомогенну світлову пляму. В Інституті проблем реєстрації інформації (ІПРІ) НАН України розроблено алгоритм моделювання і виконано комплекс розрахунків геометричних параметрів, створено технологію формування та виготовлення

серію таких лінз Френеля [1–3]. Розглянемо деякі оптичні характеристики реально створених спеціалізованих плоско-фокусувальних кільцевих лінз нової серії.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛІНЗ ФРЕНЕЛЯ

Методику розрахунку параметрів плоско-фокусувальної оптики детально викладено в декількох попередніх наших публікаціях, зокрема в роботі [4]. Перш за все, визначається радіус r_V гомогенної світлової плями в фокусі лінзи і визначається схема оптимізації фокусування випромінювання [4] для формування зображення. Відповідно, на поверхні лінзи формується центральна зона без рельєфу радіусом $R_0 = r_V$. В центрі фокального зображення моделюється не освітлена область радіусом r_j ($j = 0, 1, \dots, N$), яка створюється для усунення небажаного центрального максимуму інтенсивності. Зазвичай, величина «темної» області r_0 становить 0,2–0,4 мм. Вважається [4], що зазначена «темна» область для реально виготовлених лінз заповнюється пройденим світлом, який розсіяний на дефектах мікрорельєфу лінзи.

Для можливості застосування при виготовленні мікропризмової оптики методу алмазного мікроточіння [5–6] можна створювати призмові зони лінзи ΔR_k з декількох окремих складових мікропризм шириною ΔR_{kc} , ідентичних за глибиною рельєфу h_k та кутом рефракції α_k , тобто $\Delta R_k = \Sigma \Delta R_{kc}$. Величина ΔR_{kc} не може перевищувати значення 1,2–1,5 мм [4, 7], яке відповідає розмірам ріжучої кромки наявного алмазного інструменту, застосованого для формування мікрорельєфу.

Зазвичай, згідно з технічним завданням потенційного замовника, плоско-фокусувальні лінзи для систем стеження за рухомими об'єктами проектувалися з робочим діаметром $D_L = 52$ мм при світловому діаметрі $D_S = 50$ мм для робочої довжини хвилі $\lambda = 1,064$ мкм. В останній час виявилось необхідним створити аналогічні лінзи нової серії зі зменшеним діаметром $D_L = 23$ мм при світловому діаметрі лінзи $D_S = 21$ мм. Фокальна відстань задана незмінною і становить $f = 17$ мм.

Основним призначенням нової оптики є її використання в оптичних блоках систем стеження, для яких основним завданням є встановлення самого факту присутності в повітрі рухомих об'єктів. Поставлена задача зберегти кутовий діапазон огляду при половинній чутливості фотоприймача, яка при повній апертурі дорівнює ± 30 град., при цьому збільшити приймальну площу, як мінімум в 2 рази, щоб отримати максимальний світловий потік, відбитий від об'єкту або прийнятий від джерела, таким чином забезпечивши підсилення сигналу в діапазоні кутів ± 15 град.

Для вирішення поставленої задачі планувалось використати лінзи нової серії в комплексі зі стандартним фотодетектором типу Hamamatsu S6801/S6968, який обладнаний апланатичною сферичною лінзою діаметром $d_D = 14$ мм. Чутлива поверхня детектора розміром $6,0 \times 6,0$ мм² розміщується на відстані 4,5 мм від центру напівсфери вбудованої лінзи. Загальний вигляд детектора Hamamatsu S6968 для видимого спектрального діапазону і Hamamatsu S6968-01 для інфрачервоного діапазону ілюструє рис. 1-а, спектральна характеристика детекторів наведена на рис. 1-б, а схема детекторного

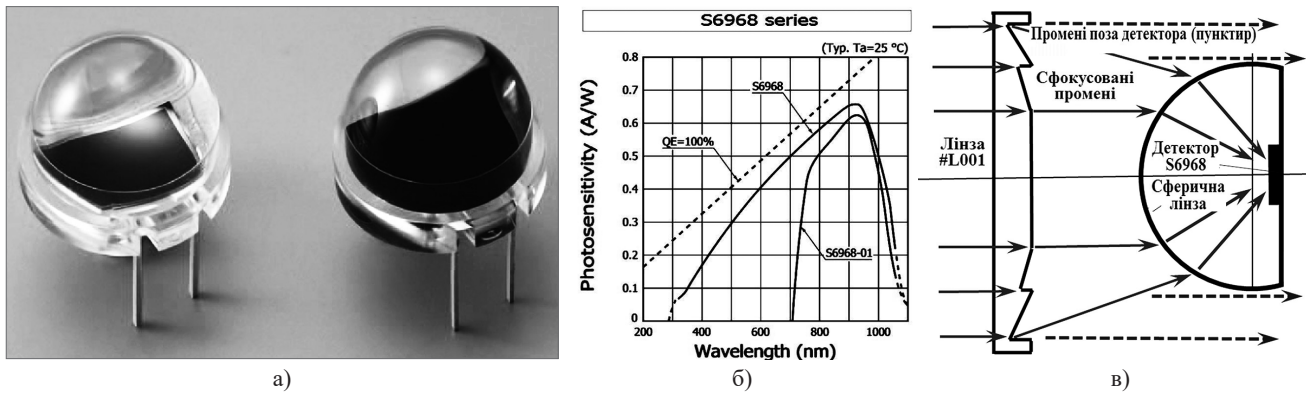


Рис. 1. Загальний вигляд детектора Hamamatsu S6968 і S6968-01 (а), спектральна характеристика детектора S6968 (б); схема детекторного блоку з лінзою ПІРІ НАН України (в)

блоку з додатковою лінзою ПІРІ НАН України зображена на рис. 1-в. Лінзи нової серії мають фокусувати на поверхні чутливої поверхні детектора периферійну частину світлового потоку діаметром $d_s = 21$ мм, що проходить поза сферичної лінзи діаметром $d_D = 14$ мм (зона штрихових ліній на рис. 1-в), не торкаючись центральної частини потоку, яка реєструється саме лінзою фотодетектора.

Особливістю розрахунку параметрів лінз нової серії, окрім зменшення кількості призматичних зон, виявилось збільшення величини α_k заломлюючих кутів мікропризм для центральних призматичних зон. Робоча довжина хвилі відповідно до спектральної характеристики детектора S6968-01 зменшена до значення $\lambda = 0,905$ мкм, відповідний коефіцієнт заломлення $n_1 = 1,5672$ згідно даним авторів [8].

Для сферичної лінзи радіусом $R_L = 7,0$ мм падаючий світловий потік з радіусами, більшими за $\sim 6,5$ мм, практично повністю відбивається від поверхні сфери. Так, на рис. 2 наведено характеристики відбиття потоку світла від поверхні такої сфери для різних відстаней L_R від осі сфери, розраховані за формулами Френеля [9]. Тому внаслідок значних втрат пройденого світлового потоку периферійними зонами сфери, доцільно створювати лінзи з плоскою центральною зоною без рельєфу з радіусами $R_0 = r_V$, меншими за 5–6 мм. Потік від цієї центральної зони практично без втрат буде фокусуватися на детекторі самою сферою, а частина потоку світла поза цією плоскою зоною фокусуватиметься додатковою лінзою.



Рис. 2. Відбиття світла від поверхні сфери радіусом $R_L = 7,0$ мм: 1 – кут відбиття (град), 2 – коефіцієнт відбиття (%); 3 – коефіцієнт пропускання (%)

Приклад розрахунків геометричних параметрів першої з таких лінз #L001 нової серії, для якої радіус гомогенної світлової плями $r_V = 4,5$ мм, наведено на рис. 3. Центральна зона лінзи без мікрорельєфу, відповідно, має радіус $R_0 = r_V = 4,5$ мм.

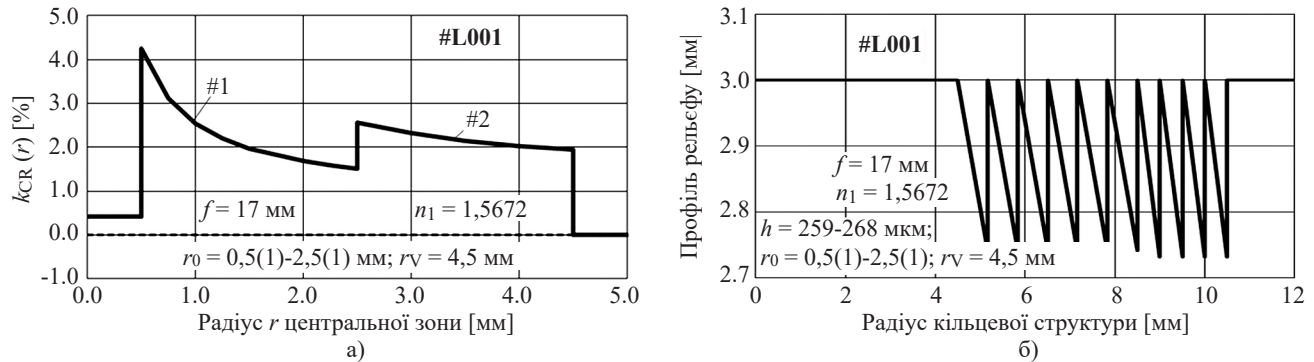
Лінза #L001 має всього дві призматичні зони, кожна з яких складається з 6 та 4 складових мікропризм, відповідно, тобто створена шляхом формування 10 канавок мікрорельєфу з двома кутами заломлення мікропризм $\alpha_k = 21,093$ і $28,066$ град., має дві глибини рельєфу $h_k = 257,15$ і $267,96$ мкм. Схема фокусування цієї лінзи #L001, в якій враховано частину пройденого потоку від плоскої центральної частини лінзи без рельєфу з радіусом $R_0 = 4,5$ мм, наведена на рис. 4а. Профіль рельєфу ілюструється на рис. 4б. Світлопропускання цієї лінзи виявилось досить задовільним і становить $\tau_s \sim 80,9$ % при світловому діаметрі $D_S = 21$ мм.

Методом алмазного мікроточіння [5–7] згідно з результатами розрахунків виготовлено нову серію тестових лінз #L001-005 з полікарбонату. Лінзи відрізняються розміром центральної плоскої зони R_0 , в якій відсутній мікрорельєф. Окрім лінз з оптимальним розміром $R_0 = 4,5$ мм (лінзи #L001-002), створено лінзи з радіусом $R_0 = 6,5$ мм (#L003), $7,0$ мм (#L004) і $9,0$ мм (#L005). Головною метою такого варіювання величини R_0 є визначення оптимальної конструкції лінзи для отримання максимального сигналу на фотодетекторі при повороті лінзи відносно пройденого потоку на фіксовані кути $\varphi = 5; 10; 15; 20; 25$ і 30 град. Схеми фокусування для лінз #L002-005 наведено на рис. 5.

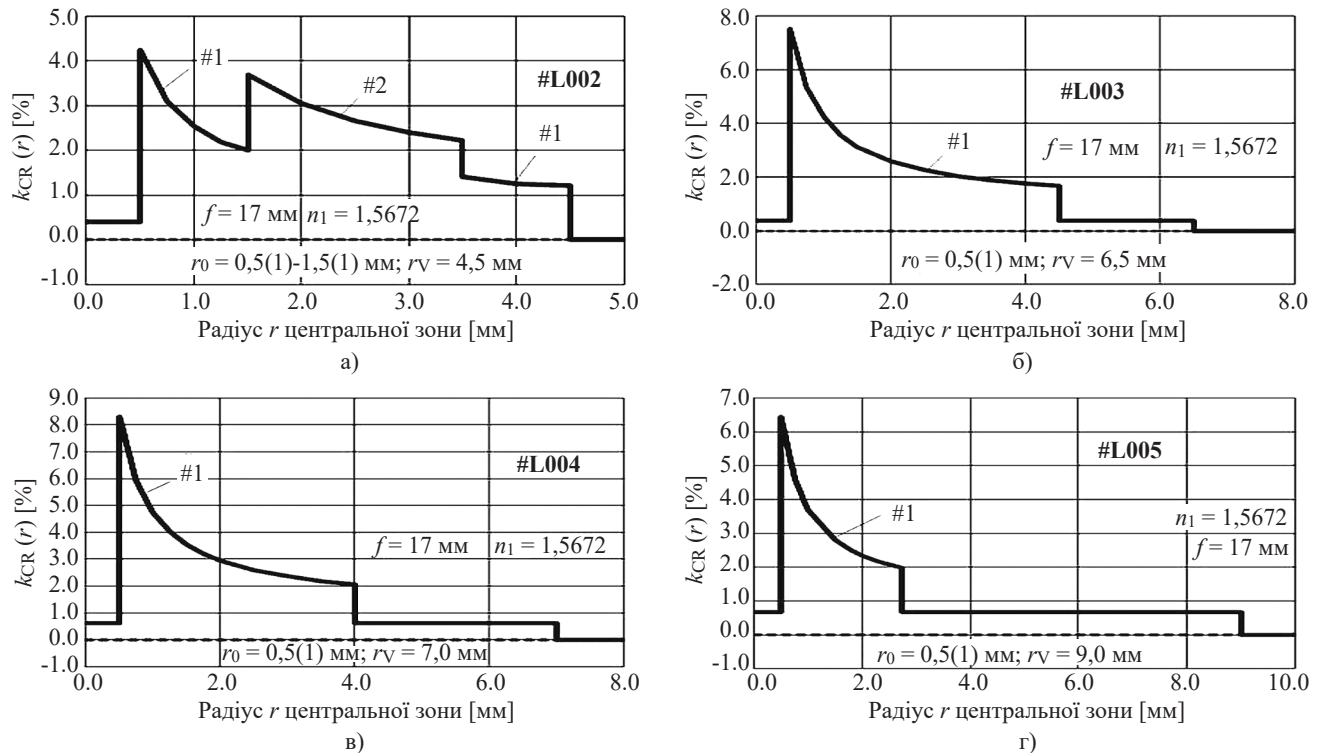
Реальні розраховані радіуси світлової плями r_V для лінз #L003-005 звужені відносно заданого розміру фокального зображення. Цей ефект пов'язаний з малою шириною призматичної зони ΔR_k лінзи порівняно з центральною зоною радіусом R_0 без рельєфу, яка саме і задає розмір освітленої площини в фокусі лінзи. Тому радіус світлової плями r_V для створених плоско-фокусувальних лінз #L003-005 з урахуванням радіуса темної зони $r_0 = 0,5$ мм становить лише 4,0; 3,5 і 2,75 мм, порівняно з заданими значеннями $r_V = 6,5; 7,0$ і $9,0$ мм, відповідно. Вважалось, що факт звуження фокальної світлової плями сприяє фокусуванню пройденого потоку в центр фотодетектора. Внесок центральної зони без рельєфу для лінз #L002-005 в освітленість світлової плями в фокусі становить, відповідно, 18; 38; 44 і 64 %,

Розрахунок лінзи # L-001																		
Розрахунок Плоско-фокус. лінзи Френеля БЦ (корекція окремих зон): $r_0 = 0,5(1)-2,5(1)$ мм																		
$h = 257-268$ мкм, $f = 17$ мм, для $\lambda = 0,905$ мкм ($n_1 = 1,5672$), $r_V = 4,5$ мм, товщина $b = 3,0$ мм, $\text{гран.кут} = 39,648^\circ$, $\tau_s = 0,9612$																		
n	N	r_0/R_k	R_k	$\gamma_s = \arctan(r_1/f)$	$\alpha = \arctan(\sin(\gamma_s/(1,564 - \cos \gamma_s)))$	α	$\Delta R_k = b + r_1 \sin \alpha$	$\beta = 90 - \alpha$	h	$\gamma - \alpha$	$\tau(fr)$	$\tau(fr)$	$\pi(r_1^2 - r_2^2)$	$\pi(r_1^2 - r_2^2) \tau(fr)$	Проп. суми зон	$\pi(r_1^2 - r_2^2) \tau(fr)$	Проп. зони	Зміщ. краю R_k
			$r_1 = 4,5$ мм	рад	град	рад	мм		мкм	град	x100	мм ²	мм ²	%	мм ²	%	мкм	
0	#00	4.500000	0.000100 4.500000	0.000005 0.231091	0.00 13.24	0.000009 0.368144	0.001 21.093		0	34.33	0.906	90.554	63.6173	57.6081	90.554 %	57.6081	16.63	
1	#01	$r_0=0,5$	5.166667	0.231091	13.24	0.368144	21.093	21.093	0.66667	68.907	257.153	34.33	0.902	90.221	20.2458	18.2660	90.430 %	60.51
2			5.833334	0.231091	13.24	0.368144	21.093	21.093	0.66667	68.907	257.153	34.33	0.902	90.221	23.0384	20.7855	# 1	60.51
3			6.500000	0.231091	13.24	0.368144	21.093	21.093	0.66667	68.907	257.153	34.33	0.902	90.221	25.8309	23.3049		60.51
4			7.166667	0.231091	13.24	0.368144	21.093	21.093	0.66667	68.907	257.153	34.33	0.902	90.221	28.6234	25.8244		60.51
5			7.833334	0.231091	13.24	0.368144	21.093	21.093	0.66667	68.907	257.153	34.33	0.902	90.221	31.4159	28.3438		60.51
6			8.500000	0.339293	19.44	0.489843	28.066	21.093	0.50000	61.934	267.967	47.51	0.902	90.221	34.2085	30.8633		60.51
7	#02	$r_0=2,5$	9.000001	0.339293	19.44	0.489843	28.066	28.066	0.50000	61.934	267.967	47.51	0.891	89.146	27.4889	24.5053	89.940 %	94.58
8			9.500001	0.339293	19.44	0.489843	28.066	28.066	0.50000	61.934	267.967	47.51	0.891	89.146	29.0597	25.9056	# 2	94.58
9			10.000001	0.339293	19.44	0.489843	28.066	28.066	0.50000	61.934	267.967	47.51	0.891	89.146	30.6305	27.3059		94.58
10			10.500000	0.339293	19.44	0.489843	28.066	28.066	0.50000	61.934	267.967	47.51	0.891	89.146	32.2013	28.7062		94.58

Р и с . 3. Фрагмент розрахунків параметрів лінзи #L001



Р и с . 4. Схема фокусування (а) і профіль мікрорельєфу (б) лінзи #L001



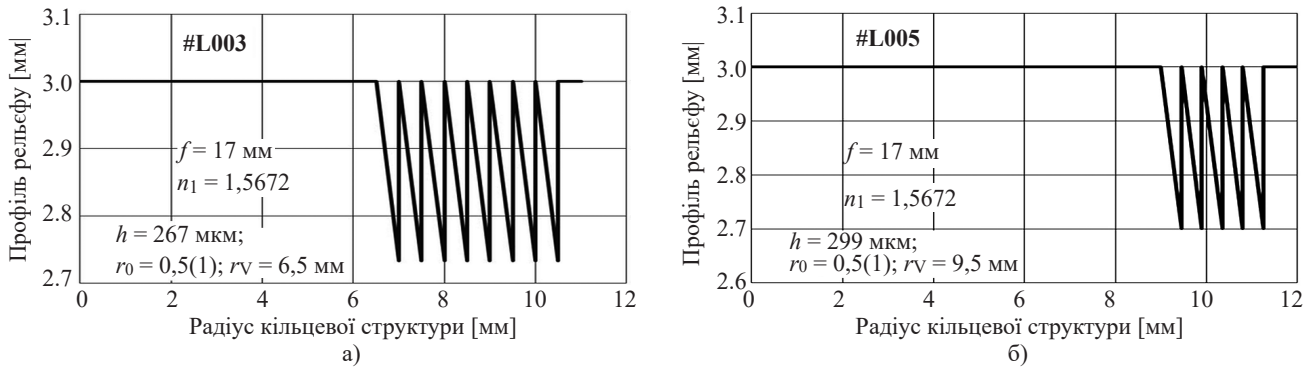
Р и с . 5. Схеми фокусування: а) – лінза #L002; б) – #L003; в) – #L004; г) – #L005

що враховано при визначенні освітлення фокальної світлової плями від потоку через плоску центральну зону лінзи без рельєфу радіусом R_0 .

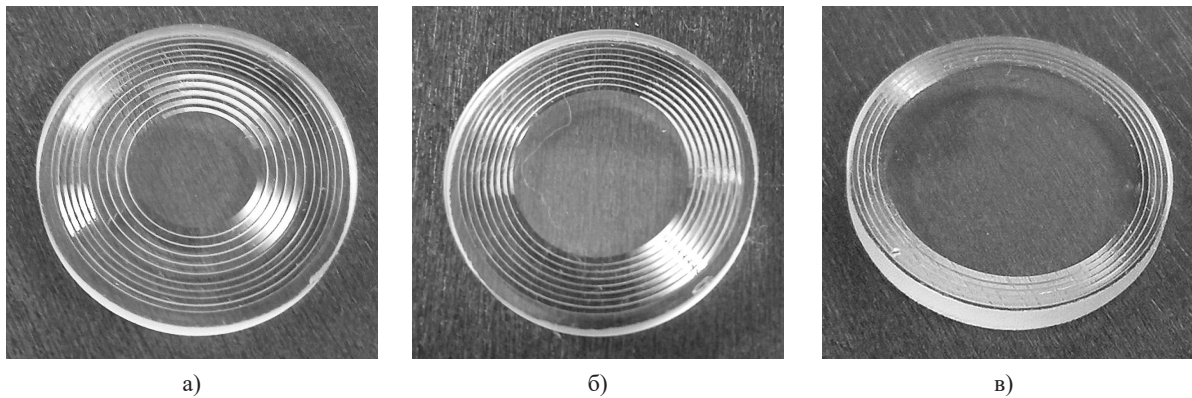
Профілі рельєфу деяких зі створених лінз з відносно великими радіусами плоских центральних зон $R_0 = r_V = 6,5$ і $9,0$ мм наведено на рис. 6. Зазначені лінзи #L003 і #L005 створені для дослідження процесу фокусування світла при кутах повороту потоку $\varphi > 15-20$ град.

Загальний вигляд деяких реально виготовлених лінз ілюструє рис. 7.

З метою розробки алгоритму формування оптики з підвищеним повним світлопропусканням τ_s було також створено лінзу #L006 світловим діаметром $D_S = 35$ мм з двома фокусами. Перші три мікропризмові зони цієї лінзи #1–3 мають заданий фокус $f = 17$ мм, а для двох останніх зон #4–5 фокальна відстань становить



Р и с . 6. Профілі рельєфу: а) – лінза #L003; б) – #L005



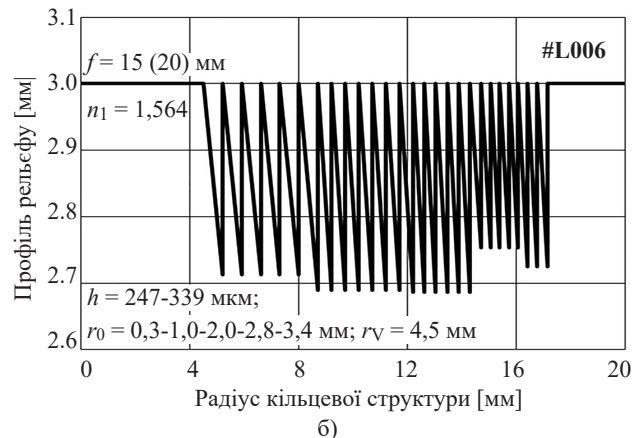
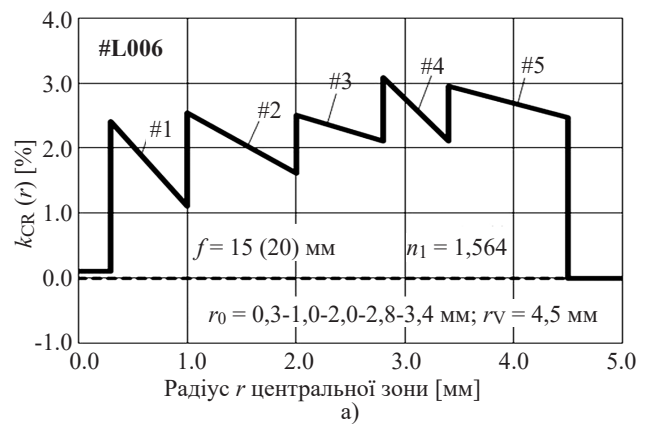
Р и с . 7. Загальний вигляд деяких лінз нової серії: а) – лінза #L002; б) – лінза #L003; в) – лінза #L005

$f = 20 \text{ мм}$, що зменшує кути заломлення мікропризм і тим самим підвищує світлопропускання відповідних призматичних зон. Лінза розрахована для довжини хвилі $\lambda = 1,064 \text{ мкм}$, радіус центральної плоскої зони лінзи становить $R_0 = 4,5 \text{ мм}$. Графік залежності світлопропускання τ_S лінзи #L006 від радіуса лінзи R_k наведено на рис. 8.

Дійсно, значення τ_S для двофокусної лінзи збільшується до $\sim 84 \%$, порівняно з величиною $\tau_S \sim 80 \%$ для однофокусної лінзи з фокусом $f = 17 \text{ мм}$ при повному світловому діаметрі $D_S = 35 \text{ мм}$. Для значення $D_S = 22 \text{ мм}$ (зони #1–2) світлопропускання становить $\tau_S \sim 88 \%$ внаслідок відносно невеликих кутів заломлення мікропризм α_k для цих двох центральних зон. Схема фокусування світла для цієї лінзи наведена на рис. 9а, профіль рельєфу ілюструється рис. 9б.



Р и с . 8. Світлопропускання лінзи #L006



Р и с . 9. Схема фокусування (а) і профіль мікрорельєфу (б) лінзи #L006

Фрагмент розрахунків параметрів рельєфу лінзи #L006 наведено на рис. 10.

Розрахунок лінзи # L 006																				
Розрахунок плоско-фокусувальної лінзи Френеля БЦ (корекція окремих зон): $r_0 = 0.5(1)-1.5(1)$ mm																				
$h = 247-339$ mkm, $f = 15$ (20) mm, для $\lambda = 1,064$ мкм ($n_1 = 1,564$), $r_1 = 4,5$ mm, товщина $B = 3,0$ mm, гранкут = $39,649^\circ$, $t_2 = 0,9512$																				
n	N	r_0/R_k	R_k	$\gamma_i = \arctan(r_i/f)$	$\alpha = \arcsin(\sin \gamma_i / (1,564 - \cos \gamma_i))$	α	$\Delta R_k = h \cdot \tan^2 \alpha_{ок}$	$\beta = 90 - \alpha$	h	$\gamma + \alpha$	$t(fr)$	$t(fr)$	$\pi(r_i^2 - r_{i-1}^2)$	$\pi(r_i^2 - r_{i-1}^2) \cdot t(fr)$	Проп. # 1-N %	$\pi(r_i^2 - r_{i-1}^2) \cdot t(fr)$ мм ²	Проп. зони %	Смещ. края R_k мкм		
		$r_1 = 4,5$ мм	рад	град	рад	град	мм		мкм	град		x100	мм ²	мм ²	суми зон	мм ²	зони			
0	#00	4.500000	0.000000	0.00	0.000000	0.000	0.000	0.70000	0	39.80	0.906	90.554	63.6173	57.6081	90.554 %	57.6081	5.99			
1	#01	$r_0 = 0.3$	5.200000	0.273009	15.64	0.421696	24.161	24.161	0.70000	65.839	314.026	39.80	0.901	90.078	21.3314	19.2150	90.206 %	156.8896	16.31	87.93
2			5.900000	0.273009	15.64	0.421696	24.161	24.161	0.70000	65.839	314.026	39.80	0.901	90.078	24.4102	21.9883				87.93
3			6.600000	0.273009	15.64	0.421696	24.161	24.161	0.70000	65.839	314.026	39.80	0.901	90.078	27.4889	24.7616				87.93
4			7.300000	0.273009	15.64	0.421696	24.161	24.161	0.70000	65.839	314.026	39.80	0.901	90.078	30.5677	27.5349				87.93
5			8.000000	0.273009	15.64	0.421696	24.161	24.161	0.70000	65.839	314.026	39.80	0.901	90.078	33.6465	30.3082				87.93
6			8.700000	0.474257	27.17	0.595255	34.106	24.161	0.50000	55.894	314.026	61.28	0.901	90.078	36.7252	33.0815				87.93
7	#02	$r_0 = 1.0$	9.200000	0.474257	27.17	0.595255	34.106	34.106	0.50000	55.894	338.597	61.28	0.860	86.006	28.1173	24.1824	88.142 %	197.6474	20.54	173.81
8			9.700000	0.474257	27.17	0.595255	34.106	34.106	0.50000	55.894	338.597	61.28	0.860	86.006	29.6881	25.5334				173.81
9			10.200000	0.474257	27.17	0.595255	34.106	34.106	0.50000	55.894	338.597	61.28	0.860	86.006	31.2588	26.8844				173.81
10			10.700000	0.474257	27.17	0.595255	34.106	34.106	0.50000	55.894	338.597	61.28	0.860	86.006	32.8296	28.2353				173.81
11			11.200000	0.474257	27.17	0.595255	34.106	34.106	0.50000	55.894	338.597	61.28	0.860	86.006	34.4004	29.5863				173.81
12			11.700000	0.474257	27.17	0.595255	34.106	34.106	0.50000	55.894	338.597	61.28	0.860	86.006	35.9712	30.9373				173.81
13			12.200000	0.597177	34.22	0.651703	37.340	34.106	0.41667	55.894	338.597	71.56	0.860	86.006	37.5420	32.2883				173.81
14	#03	$r_0 = 2.0$	12.616667	0.597177	34.22	0.651703	37.340	37.340	0.41667	52.660	317.873	71.56	0.777	77.689	32.4849	25.2371	84.888 %	164.1344	17.06	216.15
15			13.033334	0.597177	34.22	0.651703	37.340	37.340	0.41667	52.660	317.873	71.56	0.777	77.689	33.5758	26.0846				216.15
16			13.450000	0.597177	34.22	0.651703	37.340	37.340	0.41667	52.660	317.873	71.56	0.777	77.689	34.6666	26.9320				216.15
17			13.866667	0.597177	34.22	0.651703	37.340	37.340	0.41667	52.660	317.873	71.56	0.777	77.689	35.7574	27.7795				216.15
18			14.283334	0.597177	34.22	0.651703	37.340	37.340	0.41667	52.660	317.873	71.56	0.777	77.689	36.8483	28.6269				216.15
19			14.700000	0.536735	30.75	0.627759	35.968	37.340	0.34000	52.660	317.873	66.72	0.777	77.689	37.9391	29.4744				216.15
20	#04	$r_0 = 2.8$	15.040000	0.536735	30.75	0.627759	35.968	35.968	0.34000	54.032	246.734	66.72	0.815	81.476	31.7665	25.8821	84.218 %	135.3284	14.07	146.81
21			15.380000	0.536735	30.75	0.627759	35.968	35.968	0.34000	54.032	246.734	66.72	0.815	81.476	32.4929	26.4739				146.81
22			15.720000	0.536735	30.75	0.627759	35.968	35.968	0.34000	54.032	246.734	66.72	0.815	81.476	33.2192	27.0657				146.81
23			16.060000	0.536735	30.75	0.627759	35.968	35.968	0.34000	54.032	246.734	66.72	0.815	81.476	33.9455	27.6575				146.81
24	#05	$r_0 = 3.6$	16.400000	0.576375	33.02	0.644225	36.911	35.968	0.36667	54.032	246.734	69.94	0.815	81.476	34.6719	28.2493				146.81
25			16.766667	0.576375	33.02	0.644225	36.911	36.911	0.36667	53.089	275.415	69.94	0.777	77.708	38.2053	29.6884	83.425 %	91.0345	9.46	179.02
26			17.133334	0.576375	33.02	0.644225	36.911	36.911	0.36667	53.089	275.415	69.94	0.777	77.708	39.0500	30.3448				179.02
27			17.500000	0.576375	33.02	0.644225	36.911	36.911	0.36667	53.089	275.415	69.94	0.777	77.708	39.8947	31.0013				179.02

Р и с . 10. Фрагмент розрахунків параметрів лінзи #L006

При розрахунках геометричних параметрів цієї лінзи не враховувалось розширення призмових зон внаслідок звуження заломлених світлових потоків [4], оскільки кожна зі створених призмових зон #1–5 складається з декількох ідентичних складових мікропризм і зазначене звуження потоків не виникає.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ЛІНЗ

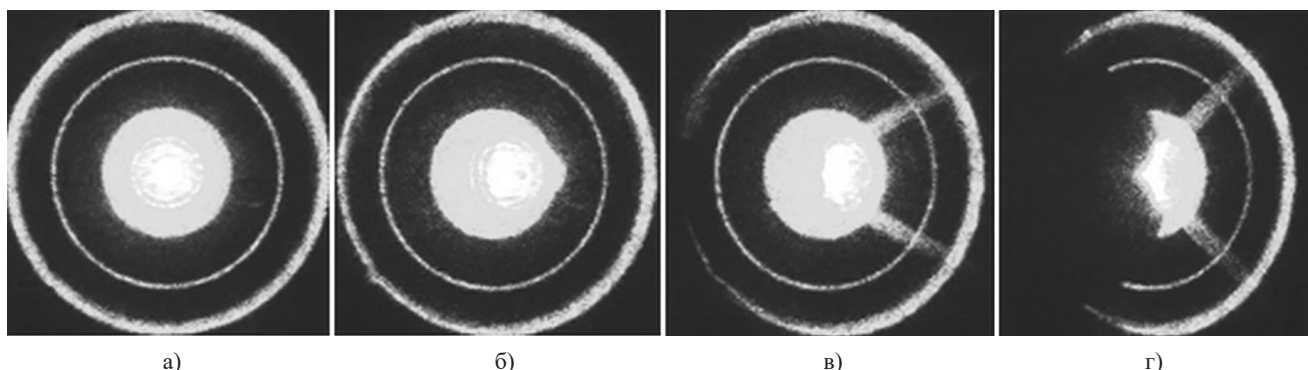
Для експериментального дослідження виготовлених зразків плоско-фокусуєчих лінз модернізовано лазерний стенд [4], який дозволяє отримувати на матовому напівпрозорому екрані зображення паралельного пучка світла від лазера, пройденого через досліджувану лінзу. Пучок створюється трьохлінзовою конденсорною системою, «зелений» ніодимовий лазер з подвоєнням частоти має довжину хвилі $\lambda = 0,532$ мкм окрім променя з довжиною $\lambda = 1,064$ мкм для основної моди. Діаметр колімованого світлового потоку в площині екрану $D_s = 59$ мм. Для дослідження форми сигналу на екрані використовувалася фотореєстрація зображення камерою Canon-7000, кількісна реєстрація інтенсивностей можлива за допомогою фотодіоду типу ФД288А.

На рис. 11 наведено розподіл на екрані інтенсивності пройденого через лінзу #L002 паралельного колімованого лазерного променя при декількох кутах повороту лінзи в світловому потоці для номінальної відстані спостереження від екрану до рельєфу лінзи $L_s = 17$ мм. Дослідження проведено для видимого спектрального діапазону для $\lambda = 0,532$ мкм з метою візуалізації просторових змін розподілу.

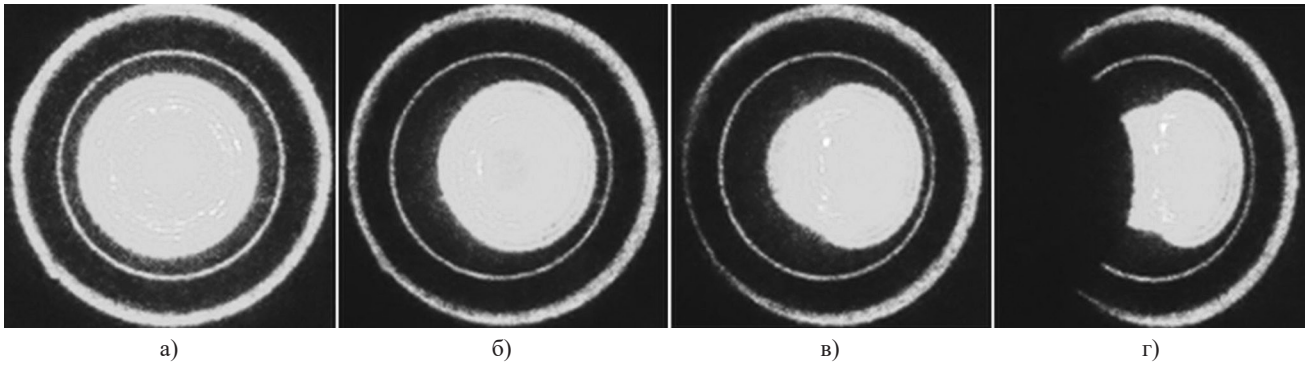
При зменшенні відстані спостереження до значення $L_s = 10$ мм (рис. 12) розподіл освітленості на екрані при повороті лінзи в потоці стає більш гомогенним і більш сконцентрованим в центральних зонах зображення, що важливо при кількісних дослідженнях енергетичних характеристик лінз.

З отриманих на лазерному стенді розподілів освітленості екрану при повороті лінз в потоці можна зробити висновок про доцільність зменшення відстані L_s при визначенні енергетичних характеристик фотодетектора з додатковою лінзою, оскільки в такому режимі зміщення зображення від центру є мінімальним.

Профілограми сфокусованого зображення на екрані для лінзи ##L002 для відстані спостереження $L_s = 10$ мм наведено на рис. 13. Для визначення про-



Р и с . 11. Зображення на екрані для лінзи #L002 ($f_0 = 17$ мм, $r_v = 4,5$ мм, $L_s = 17$ мм) для $\lambda = 0,532$ мкм: кут повороту $\varphi = 0$ град. (а); 10 град. (б); 20 град. (в); 30 град. (г)

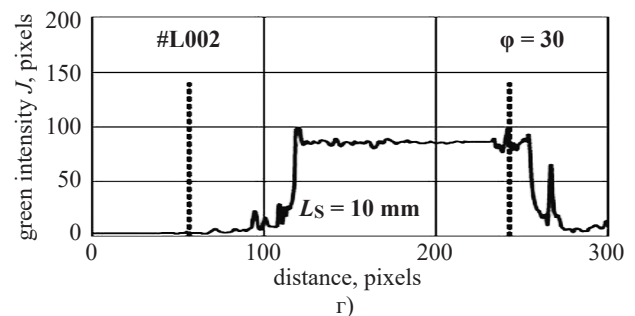
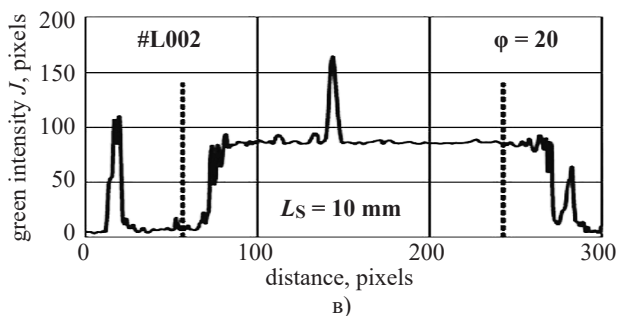
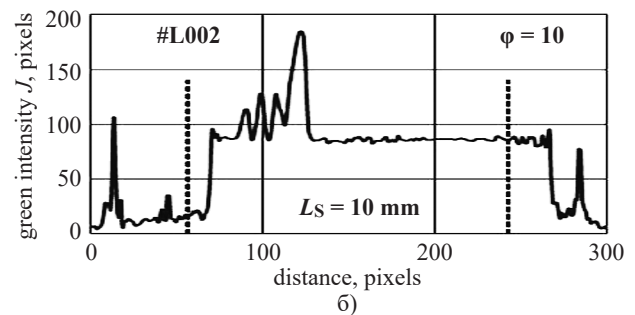
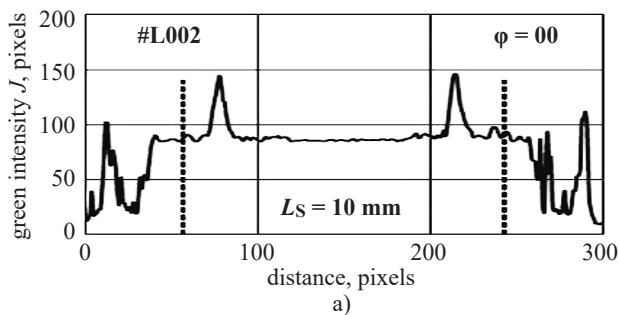


Р и с . 12. Зображення на екрані для лінзи #L002 ($f_0 = 17$ мм, $r_V = 4,5$ мм, $L_S = 10$ мм) для $\lambda = 0,532$ мкм: кут повороту $\varphi = 0$ град. (а); 10 град. (б); 20 град. (в); 30 град. (г)

філів інтенсивностей використовувалась програма *Image J 1.53* [10].

Для визначення фокусувальних властивостей детектора Hamamatsu S6968-01 при використанні додаткових лінз #L001-005, створено спеціальний оптичний стенд. Лінза жорстко фіксується на заданій відстані L_D від площини рельєфу до поверхні сфери детектора в картриджі, який повертається в світловому потоці на необ-

хідні кути $\varphi = 0-30$ град. навколо радіальної осі лінзи. Відстань L_D може змінюватися в діапазоні 1,0–25,0 мм для дослідження різних режимів фокусування проведеного потоку. Картридж з певною лінзою і детектором освітлюється колімованим паралельним світловим потоком від «зеленого» лазера, реєструється інтенсивність потоку на довжині $\lambda = 1,064$ мкм. Детектор S6968-01 в картриджі з лінзою #L002 зображено на рис. 14.



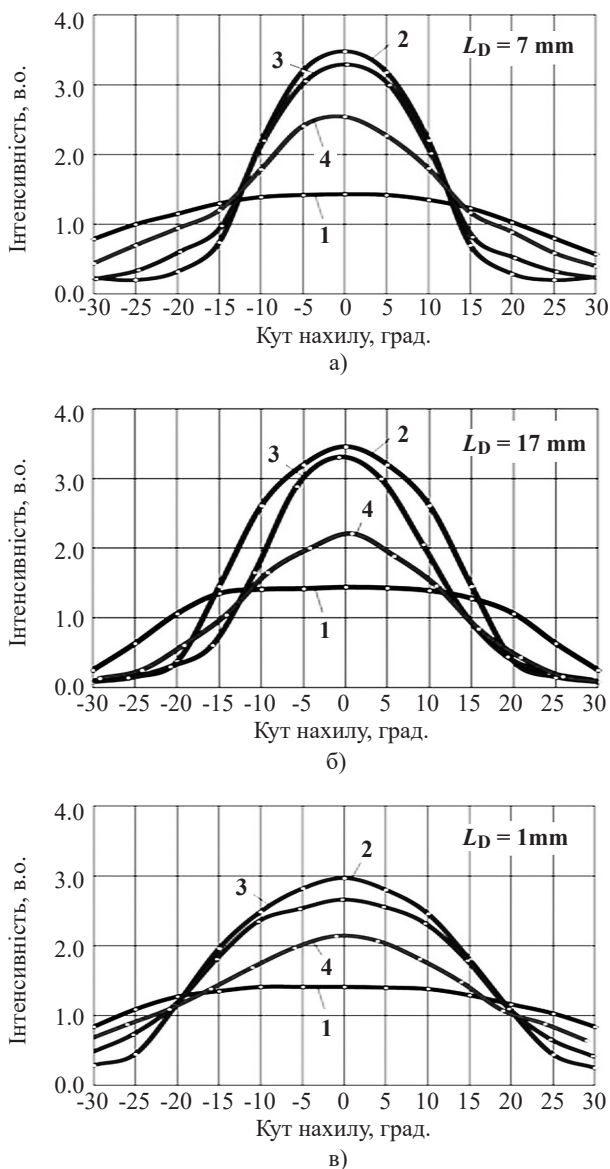
Р и с . 13. Профілограми плями для лінзи #L002 ($f_0 = 17$ мм, $r_V = 4,5$ мм; $L_S = 10$ мм): кут повороту $\varphi = 0$ град. (а); 10 град. (б); 20 град. (в); 30 град. (г)



Р и с . 14. Загальний вигляд детектора Hamamatsu S6968-01 в картриджі з лінзою #L002: а – картридж для $L_D = 1,0$ мм; б – картридж зі змінним фокусом $L_D = 7-25$ мм; в – картридж для $L_D = 10$ мм

Кількісні вимірювання інтенсивності світлового потоку на інфрачервоній довжині хвилі $\lambda = 1,064$ мкм, пройденого через сферичну лінзу детектора S6968-01, а також через лінзу детектора з додатковими лінзами #L002-005 при декількох кутах повороту картриджа в потоці, наведено на рис. 15. На першому етапі лінза з фокусом $f = 17$ мм розміщувалась в картриджі на відстані $L_D = 7$ мм (рис. 15а) від поверхні сфери радіусом $R_D = 7,0$ мм, тобто поверхня детектора Hamamatsu S6968-01 знаходилась практично в фокусі лінзи.

Використання додаткової лінзи радіусом $R_L = 10,5$ мм з площею $S_L = 346$ мм², яка \sim в 2,6 рази перевищує активну робочу площу детектора з радіусом $R_D = 6,5$ мм, призводить до збільшення зареєстрованого потоку приблизно до такого саме значення (2,54 рази) для нормального падіння променів. Для відстані спостереження $L_D = 7$ мм при повороті лінзи з детектором в потоці зареєстрований сигнал зменшується і при куті повороту



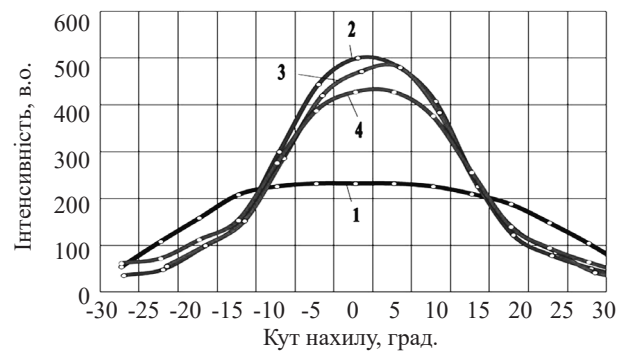
Р и с . 15. Інтенсивність пройденого потоку для $L_D = 7$ мм (а); $L_D = 17$ мм (б) і $L_D = 1$ мм (в): 1 – без лінзи; 2 – з лінзою #L002; 3 – з лінзою #L003; 4 – з лінзою #L005

$\varphi = 13-15$ град. лінза втрачає свою ефективність – сигнал без додаткової лінзи перевищує сигнал з лінзою.

При збільшенні відстані спостереження до значення $L_D = 17$ мм, при повороті картриджа всі зареєстровані інтенсивності знижуються (рис. 15б), зокрема через екранування світлового потоку боковими стінками картриджа. Додаткові лінзи збільшують зареєстрований світловий потік лише до кутів повороту $\varphi < 12-16$ град.

При зменшенні відстані спостереження до значення $L_D = 1,0$ мм при наявності додаткових лінз інтенсивність зареєстрованого сумарного заломленого потоку світла при всіх кутах повороту картриджа дещо зменшується (рис. 15в), однак потік з лінзами залишається більшим потоку без лінз до кутів повороту $\varphi \approx 18-20$ град.

Дослідження рефракції пройдених променів на спеціальному натурному стенді з інфрачервоним лазером з довжиною хвилі $\lambda = 0,905$ мкм для номінальної відстані спостереження, результати яких наведені на рис. 16, виявили ефект, аналогічний наведеному на рис. 15а. При кутах падіння променів $\varphi < 14-15$ град. додаткові лінзи призводять до помітного збільшення повного пройденого потоку світла, зібраного детектором S6968-01. Однак, при більших кутах падіння всі лінзи виявились не ефективними – зареєстрована інтенсивність потоку світла лише зменшується.



Р и с . 16. Рефракція променя для $\lambda = 0,905$ мкм на сфері $R = 7,0$ мм з деякими лінзами: 1 – без лінз; 2 – лінза #L002 ($r_V = 4,5$ мм); 3 – лінза #L003 ($r_V = 6,5$ мм); 4 – лінза #L004 ($r_V = 7,0$ мм)

Планувалось також провести дослідження при освітленні картриджа з детектором і лінзою за допомогою світлодіоду з довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 0,68$ мкм. На жаль, наявні на даний час детектор S6968-01 і джерело освітлення з такою довжиною хвилі не дозволяють безпосередньо провести дослідження фокусуємих властивостей детектора Hamamatsu S6968-01 з додатковими лінзами, оскільки їх спектральні характеристики не співпадають. Такі практичні дослідження можливі після отримання іншого кремнієвого фотодетектора типу S6968 або S6801 з більш широкою спектральною характеристикою, що включає видиму частину спектру (рис. 16) або використання світлодіодного джерела освітлення для інфрачервоної зони спектру з довжиною хвилі $\lambda \sim 0,8-1,0$ мкм.

Таким чином, використання додаткових лінз в комплексі з детектором Hamamatsu S6968-01, обладнаного власною сферичною лінзою, в ряді режимів виявляється ефективним. При кутах повороту оптичного блоку

в світловому потоці на кути, менші за $\varphi < 18\text{--}20$ град. спостерігається збільшення зареєстрованого повного світлового потоку відносно потоку без лінз. Для нормального падіння променів збільшення потоку становить 2,0–2,6 рази, що на практиці значно підвищує надійність реєстрації сигналів, відбитих від спостережуваних об'єктів. Однак при більших кутах повороту блоку в потоці додаткові лінзи виявились неефективними – наявність лінз призводить лише до зменшення сигналу фотодетектора.

ВИСНОВКИ

Розроблено методику розрахунків параметрів спеціалізованих плоско-фокусувальних лінз нової серії для систем автоматичного стеження за рухомими об'єктами зі зменшеними оптичними діаметрами. Виконано комплекс розрахунків геометричних параметрів такої оптики. Методом алмазного лезового мікроточіння на основі розрахункових параметрів сформовано тестові зразки таких лінз.

Методом лазерної діагностики досліджено тестові зразки створених лінз. Результати досліджень лінз при їх повороті в світловому потоці підтвердили відповідність отриманих параметрів реально виготовлених лінз розрахунковим даним.

Застосування додаткових лінз в картриджі з детектором Hamamatsu S6968-01 в ряді режимів реєстрації виявилось ефективним при повороті оптичного блоку в світловому потоці на кути $\varphi < 18\text{--}20$ град. При більших кутах використання додаткових лінз не доцільне, оскільки спостерігається зменшення зареєстрованого фотодетектором випромінювання.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Antonov, E.E., Fu, M.L., Petrov, V.V., Manko, D.Yu. & Rong, K.H. (2021). Structure of Microprismatic Fresnel Lenses for Creating Uniform Focal Images. *Optics Express*. Vol. 29. # 24. Pp. 38958—38970. <https://doi.org/10.1364/OE.438590>
- Antonov, E.E., Lapchuk, A.S., Petrov, V.V., Tokalin, O.A. & Zenin, V.N. (2022). Photodetector module of optoelectronic control systems for tracking the moving objects. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. Vol. 25. #3. Pp. 315—322. <https://doi.org/10.15407/spqeo25.03.315>.
- Петров В.В., Антонов Є.Є., Зенін В.М., Крючин А.А., Шанойло С.М. Мікропризмове плоско-фокусуєча френелівська оптика для систем автоматичного керування рухомими об'єктами. *Озброєння та військова техніка*. 2024. № 1(41). С. 111—121. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2024.1\(41\).111-121](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2024.1(41).111-121).
- Antonov, E.E., Lysenko, V.S., Manko, D.Yu., Martynyuk, I.A., Petrov, V.V. & Zenin, V.N. Plane-Focusing Fresnel Lenses for Oblique Incidence of Light Rays. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. 2025. Vol. 27. #2. Pp. 183—193. <https://doi.org/10.15407/spqeo28.02.183>.
- Brinksmeier, E., Glabe, R. & Schonemann, L. (2012). Diamond micro chiseling of large-scale retroreflective arrays. *Precision Engineering*. #36. Pp. 650—657. [10.1016/j.precisioneng.2012.06.001](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.06.001).
- Tan, N.Y.J., Lim, Z.H., Zhou, G., Liu, K. & Kumal, A.S. (2021). Design and fabrication of composite polygonal Fresnel lenses. *Opt. Express*. Vol. 29. No 22. Pp. 36516—36534. [doi: 10.1364/OE.436290](https://doi.org/10.1364/OE.436290).
- Зенін В.М., Антонов Є.Є. Особливості розрахунку геометричних параметрів алмазного різця для формування кільцевих лінз Френеля. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2024. Т. 26. № 2. С. 73—80. <http://drsp.ipri.kiev.ua/article/view/316913>
- Sultanova, N., Kasarova, S. & Nikolov, I. (2009). Dispersion properties of optical polymers, *Acta Physica Polonica A*. Vol. 116. Pp. 585—587. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.116.585>.
- Antonov, E.E., Kryuchyn, A.A., Mingley, Fu, Petrov, V.V., Shahoilo, S.M. & Zichun, Le. *Microprisms: Optical Parameters and Monitoring*. K.: Akademperiodika. 2015. 146 p.
- Image J Program. UPL: Image J Program. UPL: <https://soft.mydiv.net/win/download-ImageJ.html>

REFERENCES

- Antonov E.E., Fu M.L., Petrov V.V., Manko D.Yu., Rong K.H. Structure of Microprismatic Fresnel Lenses for Creating Uniform Focal Images. *Optics Express*, 2021. V.29, #24. P.38958-38970; <https://doi.org/10.1364/OE.438590>.
- Antonov E.E., Lapchuk A.S., Petrov V.V., Tokalin O.A., Zenin V.N. Photodetector module of optoelectronic control systems for tracking the moving objects. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2022. V.25, #3. P.315–322. <https://doi.org/10.15407/spqeo25.03.315>.
- Petrov V.V., Antonov E.E., Zenin V.M., Kriuchyn A.A., Shanoilo S.M. Microprism Plane-Focusing Fresnel Optics for Systems of Automatic Control for Moving Objects. *Weapons and Military Equipment*, 2024. V.1(41). P.111-121. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2024.1\(41\).111-121](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2024.1(41).111-121).
- Antonov E.E., Lysenko V.S., D.Yu.Manko, I.A.Martynyuk, Petrov V.V., Zenin V.N. Plane-Focusing Fresnel Lenses for Oblique Incidence of Light Rays. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, 2025. V.27, #2. P.183-193. <https://doi.org/10.15407/spqeo28.02.183>.
- Brinksmeier E., Glabe R., Schonemann L. Diamond micro chiseling of large-scale retroreflective arrays. *Precision Engineering*. 2012. 36. P. 650-657; <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.06.001>.
- Tan N.Y.J., Lim Z.H., Zhou G., Liu K., Kumal A.S. Design and fabrication of composite polygonal Fresnel lenses. *Opt. Express*. 2021. 29, No 22. P. 36516–36534. <http://doi.org/10.1364/OE.436290>.
- Zenin V.N., Antonov E.E. Peculiarities of Calculating the Geometrical Parameters of Diamond Cutter for Ring Fresnel Lens Formation. *Data Recording, Storage & Processing*, 2024. V.26, #2. P.73-80. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2024.26.2.316913>.
- Sultanova N., Kasarova S., Nikolov I. Dispersion properties of optical polymers, *Acta Physica Polonica A*, 2009. V.116. P.585-587. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.116.585>.
- Antonov E.E., Kryuchyn A.A., Mingley Fu, Petrov V.V., Shahoilo S.M., Zichun Le. *Microprisms: Optical Para-*

meters and Monitoring. K.: Aradempirika. 2015. 146 p.
10. Image J Program. UPL:<https://soft.mydiv.net/win/download-ImageJ.html>

**Petrov V.V., Antonov E.E., Zenin V.N.,
Milevskyi V.E.**

SIMULATION OF THE OPTICAL PARAMETERS OF SPECIALIZED FLAT-FOCUSING OPTICS

An algorithm has been developed for the development of specialized plane-focusing optics with diminished light diameters, which is intended for use in automated tracking systems for moving objects. A complex of different geometric parameters of such optics has been calculated. Test samples of such lenses are formed using diamond-cutting micro-cutting technology based on the simulation results. A feature of focusing structures created by the diamond cutting technique is a discrete change in the refractive angles of microprismatic zones, resulting in the discreteness of the images formed in the focus. This is a main difference from Fresnel focusing optics with aspherical convex circular surfaces, when the angles of refraction change continuously. In the manufacture of such new devices by the diamond cutting method it is possible to obtain almost mirror working surfaces of a high optical quality. However, the size of such conical refracting zones should not be too large to reduce the discreteness of the formed images, so the new specified focusing microprisms are made from several totally identical prismatic elements. Test samples of the created lenses were examined using the laser diagnostics method. Energy characteristics of created lenses were investigated and their angular dependences were obtained. The obtained results made it possible to optimize the parameters of transforming optics and create flat-focus lenses that are more suitable for practical utilization.

Keywords: *geometric parameters of lenses, ring focusing structures, laser diagnostics of parameters for microprism lenses.*

Відомості про авторів:

Петров Вячеслав Васильович

академік НАН України
доктор технічних наук, професор
директор
Інститут проблем реєстрації інформації
Національна академія наук України
м. Київ, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-7265-9889>
e-mail: petrov@ipri.kiev.ua

Антонов Євген Євгенович

доктор технічних наук
старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник
Інститут проблем реєстрації інформації
Національна академія наук України

м. Київ, Україна
<http://orcid.org/0000-0003-4471-8287>
e-mail: antv1947@gmail.com

Зенін Володимир Миколайович

науковий співробітник
Інститут проблем реєстрації інформації
Національна академія наук України
м. Київ, Україна
<http://orcid.org/0009-0005-16653-9743>
e-mail: zenin51@gmail.com

Мілевський Вадим Євгенійович

провідний інженер-конструктор оптичних та оптико-електронних приладів
Інститут проблем реєстрації інформації
Національна академія наук України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0006-4706-8143>
e-mail: mylevsky@ukr.net

Information about the authors:

Petrov Viacheslav

Academician of NAS of Ukraine
Doctor of Engineering Sciences, Professor
Director
Institute for Information Recording
National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-7265-9889>
e-mail: petrov@ipri.kiev.ua

Antonov Eugene

Doctor of Engineering Sciences
Senior Researcher
Leading Scientific Researcher
Institute for Information Recording
National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0003-4471-8287>
e-mail: antv1947@gmail.com

Zenin Volodymyr

Scientific Researcher
Institute for Information Recording
National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0009-0005-16653-9743>
e-mail: zenin51@gmail.com

Milevskyi Vadim

Senior Design Engineer in Optics and Optoelectronics
Institute for Information Recording
National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0006-4706-8143>
e-mail: mylevsky@ukr.net

Стаття прийнята до редколегії 14.04.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.