

УДК 535.241.5

**В. В. Петров, С. М. Шанойло, Є. Є. Антонов,
О. І. Гранат, В. М. Зенін, В. Г. Кравець**
Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Світлоповертання: проблеми та досягнення

Проведено аналіз світлоповертальних структур, які використовуються в різних галузях народного господарства. Запропоновано методикку оптимізації характеристик світлоповертальних елементів. Досліджено світлоповертальні параметри таких структур, які мають максимальне світлоповертання при заданому куті освітлення.

Ключові слова: світлоповертальний елемент, кут освітлення, коефіцієнт відбиття, ефективна поверхня.

Багаторічний досвід Інституту проблем реєстрації інформації (ІПРІ) НАН України в галузі лазерного запису інформації сприяв розвитку в останні роки нового напрямку зі створення мікропризмових технологій світлоповертання. На перший погляд, такий перехід здається досить несподіваним, але в зазначених напрямках є багато спільного. Перший та другий напрямки відносяться до галузі високих технологій, де звичайними є надвисокі вимоги до обладнання та інструменту для виготовлення та тиражування кінцевих виробів, коли лінійні та кутові розміри вимірюються долями мікрона та кутовими секундами.

Загальні вимоги до світлоповертальних елементів

Світлоповертальним елементом або світлоповертачем (катафотом) будемо називати пристрій, що здатний відбивати промінь світла, який попадає на нього, у напрямку, строго зворотному напрямкові падаючого променя. Цей процес називається звертанням променя або звертанням хвильового фронту, коли три координати хвильового вектора k світлової хвилі змінюються на протилежні:

$$(k_x, k_y, k_z) \rightarrow (-k_x, -k_y, -k_z). \quad (1)$$

Найвідомішим світлоповертачем, звичайно, є дзеркало, якщо падаючий промінь спрямований строго нормально до його поверхні. Однак, саме в цьому є головний недолік дзеркала, як світлоповертача: на практиці потрібні світлоповерта-

льні елементи, які здатні звертати падаючий промінь у широкому кутовому діапазоні освітлення робочих поверхонь.

Усі сучасні світлоповертальні елементи умовно можна розділити на дві великі групи. Першу складають елементи з використанням мікросфер (скляних кульок), які імплантуються тим або іншим способом у середовище базової матриці із прозорого у видимій області спектра матеріалу, і виконують функцію світлоповертального елемента. Другу групу складають елементи з мікрорельєфом, який сформований на утворюючій поверхні таким чином, що утворюються групи кутових відбивачів із трьох взаємно перпендикулярних граней, здатних звертати падаючий на них промінь світла.

За своїми світлотехнічними характеристиками мікропризмові світлоповертальні елементи набагато досконаліші від мікросферичних, які малоефективні на великих відстанях освітлення. Мікрорельєф на поверхні може створюватися різними способами. Найбільш технологічним є метод так званого «алмазного» різання, коли на поверхні матриці-оригіналу з м'якого матеріалу (алюміній, бронза, мідь і т.д.) шляхом механічного різання алмазним різцем спочатку створюється необхідний мікрорельєф. Далі методами гальваніки з матриці-оригіналу вирощується робоча матриця з досить твердого матеріалу, найчастіше, з нікелю, за допомогою якої шляхом гарячого пресування або лиття під тиском тиражуються робочі світлоповертальні елементи із прозорих пластичних матеріалів. Надалі будемо розглядати світлоповертальні елементи з мікрорельєфом, що створюється на твердих і гнучких поверхнях саме методом «алмазного» різання. Подібні елементи конструктивно можуть бути виготовлені у вигляді плоских оптичних елементів або плівки зі світлоповертальною поверхнею.

Важливою вимогою є технологічність виготовлення світлоповертальних елементів. Так, одним із цікавих напрямків є створення мікропризмових елементів, у яких тригранний мікрокуб утворюється двома серіями взаємно перпендикулярних граней, які розташовані під кутом 45° до утворюючої поверхні, і серією прямокутних канавок, розташованих перпендикулярно до двох перших поверхонь. Така конструкція досить ефективна з точки зору світлоповертання, однак зовсім не технологічна при виконанні операцій металізації поверхонь мікрокубів і відокремленні поверхні з мікрорельєфом від основи-матриці при тиражуванні світлоповертальних елементів.

Основною проблемою при виготовленні світлоповертачів є одержання елементів із високими світлоповертальними властивостями, які би були добре помітні водієві на автошляху з досить великої відстані (300–400 м). Удосконалення світлоповертальних характеристик елементів із мікрорельєфом із метою відповідності існуючим стандартам сьогодні здійснюється в двох основних напрямках. Першим із них є досягнення максимально високої оптичної якості всіх трьох взаємно перпендикулярних відбивних поверхонь мікрокубів, що насамперед залежить від якості застосовуваного алмазного інструменту. Сьогодні звичайними є такі характеристики. Первинний металевий блок для виготовлення матриці-оригіналу встановлюється в пристрої алмазного різання з точністю ± 100 нм, шорсткість алмазного різця не повинна перевищувати 3 нм при робочій зоні різця не менш 250 мікронів, температура робочої зони пристрою алмазного різання, самого різця й пер-

винного блоку складає 20 °С з точністю $\pm 0,01$ °С, необхідний кут заточення різця встановлюється з точністю не гірше 15" (0,004 градуси).

Іншим напрямком є поліпшення світлоповертальних властивостей елементів за рахунок удосконалення геометричних параметрів мікрокубів. Ці розробки також можна умовно розділити на два напрямки: 1) досягнення максимально можливої ефективної робочої поверхні мікропризмових елементів; 2) створення елементів із поліпшеними кутовими характеристиками в заданому діапазоні світлоповертання (0–60 градусів), що необхідно для ряду практичних застосувань (дорожні знаки, світлоповертальні стрічки, маркери для автошляхів). Наприклад, великий інтерес представляє створення високоефективних дорожніх катафотів, робоча поверхня яких розташовується під кутом 30° до полотна дороги. Пріоритет тут, безумовно, належить асиметричним мікропризмовим елементам, у яких ефективна поверхня може досягати 100 %, що є теоретичною межею світлоповертання. Подібні елементи дозволяють створити катафоти вдосконаленої конструкції, які є максимально ефективними при великих кутах освітлення їхніх робочих поверхонь, і знаходять усе більше застосування для оснащення автомобільних шляхів і магістралей у зв'язку з ростом інтенсивності дорожнього руху та відповідними високими вимогами до світлових характеристик світлоповертачів.

Моделювання асиметричних світлоповертальних елементів

Проблему оптимізації світлоповертальних елементів можна умовно розділити на дві частини: а) розробку теоретичної моделі асиметричного світлоповертального елемента, необхідну для оптимізації його геометричних параметрів; б) створення високоефективних світлоповертальних елементів із використанням розробленого технологічного оснащення на основі розрахункових характеристик елементів.

Схема типового кутового асиметричного мікропризмового відбивача [1], що має максимальне світлоповертання саме при великих кутах освітлення, наведена на рис. 1. Тригранна мікрокубічна світлоповертальна структура в такому елементі створюються двома серіями взаємно перпендикулярних канавок, одна з яких має кут 90°, а інша виготовляється таким чином, що одна її стінка перпендикулярна до утворюючої поверхні, а друга стінка розташована похило й утворює гострий кут $\alpha = 20\text{--}35^\circ$ з нормаллю до поверхні. Метою оптимізації таких асиметричних світлоповертальних елементів [2] є розробка структур, які мають для заданого кута освітлення φ_0 максимальний коефіцієнт активної апертури або, так називають, ефективну поверхню, тобто відношення площі робочої зони S елемента до загальної площі його поверхні S_0 . На рис. 1 величини L та W — кроки серій вузьких і широких канавок, відповідно, D — глибина канавок.

Враховуючи, що для кута широкої канавки 90° крок $W = 2D$, із закону Снелліуса [3] можна визначити [2] що:

$$L/W = \operatorname{tg}(\sin^{-1}((\sin\varphi_0)/1,585)). \quad (2)$$

Співвідношення (2) відповідає випадку, коли мікропризмовий рельєф, виготовлений на поверхні пластини з полікарбонату, безпосередньо граничить із пові-

трян, тобто величина $n_0 = 1,0$, а значення $n_1 = 1,585$. У загальному випадку залежність коефіцієнта активної апертури (ефективної поверхні) $k_a = S/S^*$ від кута освітлення φ_0 для елемента, що оптимізований для кута освітлення φ_0^* , визначається [2] таким чином:

$$S(\varphi_0)/S^* = L/L^* = \operatorname{tg}(\sin^{-1}((\sin \varphi_0)/1,585))/\operatorname{tg}(\sin^{-1}((\sin \varphi_0^*)/1,585))$$

для $L^* < L$; (3)

$$S(\varphi_0)/S^* = L^*/L = \operatorname{tg}(\sin^{-1}((\sin \varphi_0^*)/1,585))/\operatorname{tg}(\sin^{-1}((\sin \varphi_0)/1,585))$$

для $L^* > L$.

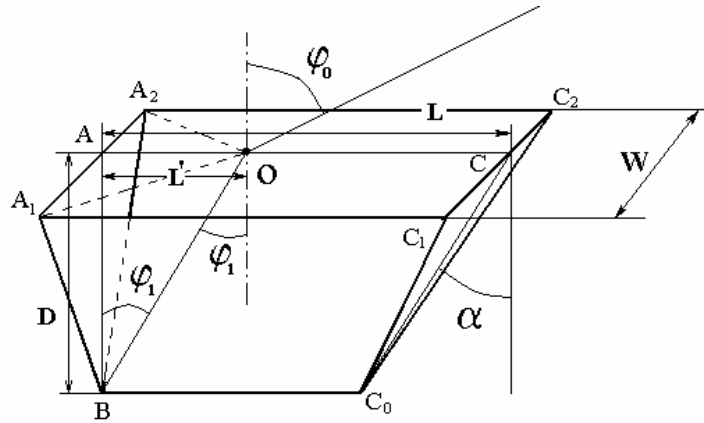
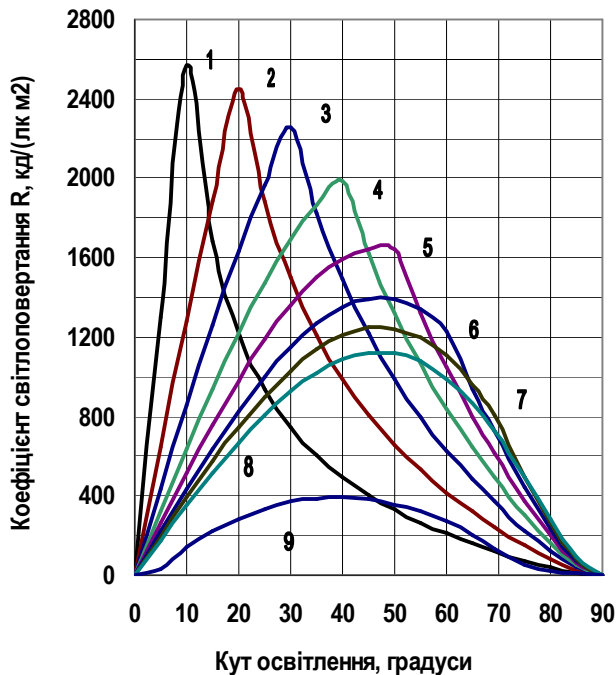


Рис. 1. Схема одного світлоповертального елемента асиметричного типу



З урахуванням (3) можна встановити взаємозв'язок між ефективною поверхнею й коефіцієнтом світлоповертання елемента $R(\varphi_0)$ [3]. Графіки таких залежностей [2] для різних кутів оптимізації $(\varphi_0)^*$ наведені на рис. 2.

Рис. 2. Коефіцієнт світлоповертання для кутів оптимізації $\varphi_0^* = 10^\circ$ (крива 1), 20° (2), 30° (3), 40° (4), 50° (5), 60° (6), 70° (7) і 90° (8). Крива 9 — експеримент ППІ для системи «полікарбонат-повітря» за умови $L/W = 0,73$

Відомий асиметричний світлоповертальний елемент [1] має істотний недолік, який полягає в низькій технологічності при здійсненні операції металізації поверхонь мікрокубів, яка необхідна для забезпечення належного коефіцієнта відбиття, та операції відокремлення елементів із мікрорельєфом від матриці-штампа при тиражуванні світлоповертальних елементів, внаслідок того що одна з робочих граней мікрокубів рельєфу вертикальна до утворюючої поверхні елемента. У результаті цього при відокремленні відбитку від матриці виникають значні внутрішні напруження, які сприяють деформаціям і пошкодженням робочих поверхонь, що веде до відповідного значного зменшення коефіцієнта світлоповертання $R(\varphi_0)$.

Симетричні світлоповертальні елементи

За коефіцієнтом активної апертури асиметричні катафоти [1] мають істотну перевагу перед так званими прямими (симетричними) [4], мікрорельєф яких симетричний відносно нормалі до утворюючої поверхні. У традиційному варіанті, мікрокубічна симетрична світлоповертальна поверхня із груп кутових відбивачів, утворюється трьома серіями заглиблень мікрорельєфу. Зазначені серії заглиблень, як правило, розміщуються під кутом 60° відносно одна одної, створюючи симетричні усічені мікротетраедри, при цьому кут між гранями $\zeta = 70^\circ 32'$. Пучок світла падає на робочі грані мікрокубів під оптимальним кутом $35^\circ 16'$, який вимірюється між кожною із граней та нормаллю до утворюючої пластини, яка називається віссю світлоповертального елемента. Максимальний коефіцієнт активної апертури k_a для таких симетричних світлоповертачів становить близько 0,67. Симетричний світлоповертальний елемент досить технологічний з точки зору здійснення процесу металізації та тиражування відбитків методом гарячого пресування або лиття під тиском, тому за коефіцієнтом світлоповертання симетричні та асиметричні елементи практично аналогічні.

Типова залежність коефіцієнта світлоповертання $R(\varphi_0)$ від кута освітлення φ_0 для деяких типів світлоповертачів наведена на рис. 3. Симетричні світлоповертачі незамінні у випадках освітлення утворюючої поверхні світлоповертача нормально до утворюючої поверхні ($\varphi_0 = 0^\circ$), або при малих кутах освітлення (аксесуари одягу пішоходів, контурне маркування автомобілів, застережливі знаки тощо), коли ефективність їхнього світлоповертання максимальна.

Зі збільшенням кута освітлення φ_0 відбувається зниження коефіцієнта світлоповертання $R(\varphi_0)$, яке досить значне при великих кутах освітлення. Це пов'язано з відповідним зменшенням коефіцієнта активної апертури k_a . На рис. 3 (крива 2) наведений графік ефективної поверхні k_a симетричного елемента в залежності від кута освітлення φ_0 з роботи [5], який нормований на відповідний коефіцієнт світлоповертання. Існує відповідна кореляція цих двох залежностей (криві 1 та 2), і зменшення світлоповертання з ростом кута освітлення φ_0 пов'язано з не оптимальними умовами освітлення груп кутових відбивачів при великих значеннях кута φ_0 . Різниця кривих 1 та 2 (рис. 3) пояснюється тим, що крива 2 фактично представляє собою теоретичну залежність ефективної поверхні $k_a = f(\varphi_0)$ від кута φ_0 , яка розрахована для одиничного симетричного усіченого тетраедра для випадку, коли кут освітлення φ_0 відносно осі елемента змінюється в площині, що перпендикулярна одному з ребер тетраедра. Крива 1 відноситься до експериментально отрима-

ного коефіцієнта світлоповертання $R(\varphi_0)$, який обумовлений відбиттям світла від декількох тисяч мікротетраєдрів рельєфу з одиниці поверхні світлоповертального елемента, і на який також впливають процеси інтерференції світла на мікрорельєфі та розсіювання світла на дефектах поверхні. Тому функція $R(\varphi_0) = f(\varphi_0)$ (рис. 3, крива 1) у позитивній та негативній областях зміни кута освітлення φ_0 виявляється симетричною відносно кута φ_0 , а теоретична функція (рис. 3, крива 2) істотно несиметрична.

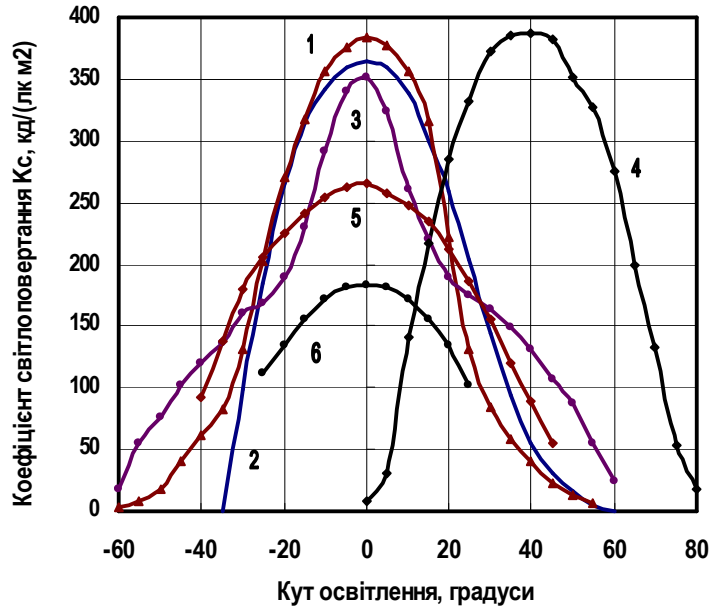


Рис. 3. Коефіцієнт світлоповертання $R(\varphi_0)$ в залежності від кута освітлення φ_0 для деяких типів світлоповертачів: 1 — симетричний мікропризмковий елемент ІПРІ; 2 — розрахункова величина світлоповертання для симетричного елемента; 3 — симетричний елемент виробництва компанії «SHI-BO» (Китай); 4 — асиметричний мікропризмковий елемент ІПРІ; 5 — плівка з мікрокульками компанії «ЗМ» (США); 6 — катафот зі скляними сферами компанії «Swareflex» (Австрія)

Істотним недоліком симетричного елемента [4] є помітне зниження коефіцієнта активної апертури k_a при відхиленні напрямку освітлення від осі елемента. Наприклад, при освітленні світлоповертальної поверхні під кутом $\varphi_0 = 30^\circ$, коефіцієнт активної апертури k_a становить лише 0,25 [6], внаслідок чого помітно знижується коефіцієнт світлоповертання $R(\varphi_0)$. Для кута $\varphi_0 = 60^\circ$, який реалізується для дорожніх катафотів, симетричний елемент [4] взагалі не може використовуватися, тому що для цього випадку $R(\varphi_0) = 0$.

Зазначений недолік можна усунути таким чином, що необхідні для світлоповертання групи кутових відбивачів із трьох взаємно перпендикулярних граней утворюються на внутрішній поверхні пластини із прозорого для світла матеріалу, яка зроблена у вигляді клину. У цьому випадку буде відновлено оптимальні умови освітлення, й промінь після заломлення в матеріалі пластини буде попадати на мікрорельєф строго вздовж осі світлоповертального елемента.

Враховуючи, що зменшення світлоповертання внаслідок зниження коефіцієнта активної апертури k_a не істотне для кутів освітлення $\varphi_0 < 10^\circ$ (рис. 3, крива 1),

яким відповідають кути заломлення $\varphi_1 < 6^\circ$, кут клиноподібної пластини θ можна визначити як $\theta = \sin^{-1}(\sin \varphi_0/n_1) - \varepsilon$, де значення ε дорівнює $\sim 6^\circ$. Тоді, наприклад, для кутів освітлення $\varphi_0 = 60^\circ, 45^\circ$ і 29° , що важливі з ряду практичних міркувань, оптимальні значення кута клину θ становлять, відповідно, близько $27^\circ, 20^\circ$ і 11° . Такі значення величини клину дозволяють забезпечити практично оптимальне освітлення граней мікрорельєфу симетричних світлоповертальних елементів і досягти максимального світлоповертання. Остаточне значення кута клину θ визначається в залежності від умов експлуатації дорожніх катафотів і матеріалу світлоповертального елемента. Як правило, оптимальна величина клину θ становить $(5-30)^\circ$.

Клиноподібну форму пластини, на якій формується мікрорельєф, можна також утворювати шляхом надання ступінчатої форми плоскогранній пластині за рахунок формування серій індивідуальних заглиблень трикутного профілю, при цьому кожне із трикутних заглиблень має один і той же кут клина θ .

Відзначимо, що всі світлоповертальні елементи незалежно від їхньої конструкції мають принциповий недолік, який полягає в тому, що при кутах освітлення φ_0 , що перевищують $50-60$ градусів, при незмінному потоці Φ_0 різко збільшуються втрати світлоповертання за рахунок зменшення освітленості одиначної поверхні катафоту $\Phi(\varphi_0) = \Phi_0 \cos(\varphi_0)$, а також через зростання втрат на відбиття світлового потоку від утворюючої поверхні, оскільки лише частина потоку $\Phi_0 \cos \varphi_0 k_{trans}$ пройде всередину катафоту. Так, при куті освітлення $\varphi_0 = 40^\circ$ ці втрати становлять 28% , а для $\varphi_0 = 60^\circ$ втрати світлоповертання зростають до 55% , тобто майже у два рази.

Компенсувати це принципове обмеження при проектуванні катафотів будь-яких типів можливо шляхом надання утворюючій пластині, на якій формується мікрорельєф, спеціального рифлення на її зовнішній поверхні.

Використання на зовнішній поверхні світлоповертального елемента спеціального рифлення зменшує необхідним чином кут освітлення поверхні елемента φ_0 і, відповідно, підвищує освітленість його поверхні при незмінному потоці Φ_0 , збільшуючи ефективність світлоповертання. Рифлення створюється у вигляді асиметричних заглиблень трикутного профілю, при цьому одна із граней розміщується паралельно напрямку освітлення поверхні світлоповертального елемента, щоб уникнути екранування світлового потоку.

Кут канавок рифлення ζ залежить від робочого кута освітлення світлоповертального елемента. В оптимальному варіанті конструкції елемента кут рифлення ζ становить $110-130^\circ$ залежно від кута освітлення φ_0 , що достатнім чином зменшує витрати світлового потоку при відбитті потоку від утворюючої поверхні елемента і підвищує ефективність світлоповертання. Наприклад, у разі виготовлення елемента з полікарбонату для випадку освітлення поверхні під кутом $\varphi_0 = 60^\circ$ та кута рифлення $\zeta = 130^\circ$, освітлення поверхні збільшується в $1,96$ рази, при цьому для значення поправки $\varepsilon = 10^\circ$, максимальне світлоповертання відповідає куту клина $\theta = 33^\circ 56'$.

Шаг серії асиметричних канавок V визначається таким чином, щоб, виходячи з режиму експлуатації зовнішніх поверхонь дорожніх світлоповертачів в умовах атмосферних забруднень, глибина канавок рифлення H не перевищувала $3-5$ мм, тому величина V залежно від кута ζ становить $9-15$ мм.

Зазначений симетричний світлоповертальний елемент дозволяє, зокрема, використовувати для масового виробництва дорожніх катафотів сучасні машини інжекційного литва, поєднуючи високу технологічність із досконаліми світлоповертальними властивостями при великих кутах освітлення робочих поверхонь.

Люмінесцентні мікрорельєфні структури

Іншим напрямком поліпшення світлоповертальних властивостей елементів є використання спеціальних люмінесцентних світлогенеруючих шарів на поверхні світлоповертача. У люмінесцентних світлоповертальних елементах відбувається об'єднання призми і люмінофорів. Головною особливістю люмінесцентних світлоповертальних структур порівняно із традиційними призмовими світлоповертачами є те, що крім суто світлоповертального ефекту такі структури за рахунок збудженої фотолюмінесценції в півці здатні додатково випромінювати світло в синій, жовтій, оранжевій або червоній областях спектра. Перевага подібних призмових структур виявляється особливо в темну пору доби та в умовах погіршеної видимості. При створенні люмінесцентних світлоповертальних елементів використовуються різні методи, такі як внесення люмінесцентної суміші в матеріали, з яких виготовляються призмові структури (полікарбонат, полівінілхлорид, поліметилметакрилат тощо), об'ємне фарбування матеріалів, нанесення люмінесцентної плівки на окрему підкладку з наступним механічним з'єднанням цих двох структур. Для досягнення максимальної ефективності люмінесцентних світлоповертальних структур використовують також комбінації різних технологічних рішень.

Поширений спосіб виготовлення люмінесцентних світлоповертальних структур [7] полягає в нанесенні на підкладку послідовності призмових світлоповертальних елементів пірамідальним твердотільним інструментом і виготовлення копій на полімерних матеріалах, які є основою для люмінесцентних світлоповертальних елементів. Далі на поверхню наносяться люмінесцентні плівки значно меншої товщини в порівнянні з товщиною основи. Для створення люмінесцентних структур зі світінням у визначеній спектральній області потрібно підбирати тип відповідних барвників.

Спосіб, що запропонований в ІПРІ НАН України [8], базується на нанесенні на поверхню світлоповертача спеціальних полімерних плівок із мікропризмовою структурою, при цьому в якості люмінесцентних плівок використовуються світлогенеруючі неорганічні матеріали, які розчинені в органічних лаках. Зазначені плівки під дією зовнішніх світлових джерел не тільки випромінюють світло в синій, зеленій та червоній областях спектра в залежності від типу добавки, а також накопичують світлову енергію, яку потім випромінюють на протязі 1–3 годин після закінчення дії зовнішнього світла. Подібні люмінесцентні структури мають адгезійну стійкість до полімерних підкладок за рахунок кремній-органічних зв'язуючих розчинників. Кінцевим етапом є технологічний процес з'єднання мікропризмових світлоповертальних елементів із люмінесцентними плівками, що базується на технології низькотемпературного зварювання тонких плівок люмінесцентних матеріалів із підкладкою, на якій сформована мікропризмозна структура. Висока ефективність світіння в подібних структурах забезпечується як повним відбиттям світла на гранях мікропризмових елементів, так і ефективним накачуван-

ням світлогенеруючих елементів світлом широкого діапазону від ультрафіолетового до середнього інфрачервоного спектра. Такі світлоповертальні структури знайдуть широке використання для оснащення автошляхів і автомагістралей, трас кабельних мереж, місць проведення аварійних і небезпечних робіт, а також для контурного маркування великовантажних автомобілів, оснащення спецодягу дорожніх робочих, працівників міліції та аварійно-рятувальних служб.

Мікрорельєфні структури в офтальмології

Ще одним напрямком застосування мікропризмових технологій, що розроблені в ІПРІ НАН України, є створення світлоповертальних елементів із мікрорельєфом для використання в офтальмології для діагностики та лікування косоокості зору.

Мікропризмовим елементом Френеля, або просто мікропризмою, будемо називати тонку пластинку із гнучкого або твердого прозорого матеріалу, одна сторона якої має гладку поверхню, а на іншу нанесений мікрорельєф, який відхиляє промінь на кут φ . Форма такого мікропризмового рельєфу схематично показана на рис. 4. Промінь світла проходить нормально до основи мікропризми з коефіцієнтом заломлення n_1 . Після заломлення на границі розділу середовищ світловий потік, що пройшов через мікропризмовий елемент, відхиляється на кут φ відносно первинного напрямку й попадає в середовище з коефіцієнтом заломлення n_2 . На рис. 4 показаний хід променів через мікропризму для випадку $n_1 > n_2$, що в офтальмологічній практиці реалізовується найчастіше.

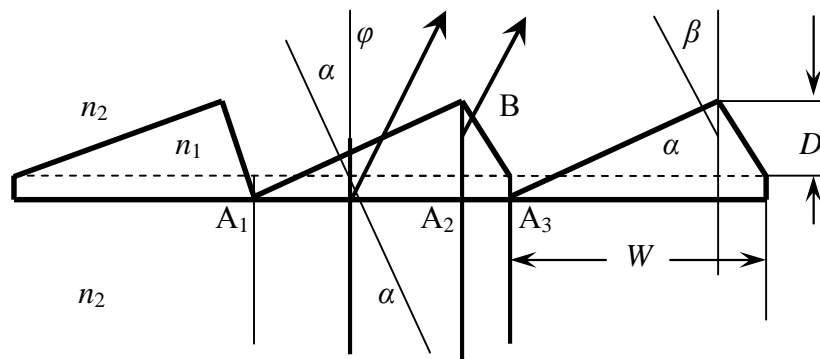


Рис. 4. Схема мікропризмового елемента Френеля. Крок рельєфу $W = 0,1\text{--}2,0$ мм, глибина рельєфу D становить $n_2 = 10\text{--}300$ мкм залежно від кроку W та оптичної сили мікропризми Δ

Оптична сила мікропризмового елемента Δ за аналогією зі звичайними скляними призмами вимірюється в призмових діоптріях (PD). Мікропризма з оптичною силою $\Delta = 1$ PD відхиляє промінь світла на величину 1 см на відстані 1 м, тобто незалежно від матеріалу призми, величина оптичної сили мікропризми Δ однозначно пов'язана з кутом відхилення призми φ , а саме: $\text{tg}\varphi = \Delta(\text{см})/100$ [9]. Співвідношення між кутом відхилення φ променя мікропризмовим елементом і кутом заломлення мікропризми α можна знову визначити із закону Снелліуса [3], який для цього випадку зручно записати у вигляді: $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin(\alpha + \varphi)$. Для випадку знаходження мікропризми в повітрі $n_2 = 1,0$, або $\text{tg}\alpha = \sin\varphi/(n_1 - \cos\varphi)$.

Відзначимо, що для цього випадку в разі виготовлення мікропризми з полікарбонату ($n_1 = 1,585$) при падінні променів світла нормально до утворюючої поверхні мікропризмового елемента, значення $\Delta = 1-50$ PD, важливі для офтальмологів, відповідають кутам заломлення $\alpha < 32^\circ 55' 37''$. Для оптичного скла ($n_1 = 1,52$) зазначений діапазон значень оптичної сили Δ відповідає кутам заломлення призми $\alpha < 35^\circ 33' 38''$.

Світловий потік проходить через мікропризмовий елемент лише при кутах заломлення, що менші за граничний кут $\alpha_{пред}$, при якому промінь світла повністю відбивається гранню призми за рахунок внутрішнього відбиття. Граничний кут заломлення $\alpha_{пред}$ визначається із закону Снелліуса (2) за умови $(\alpha + \varphi) = 90^\circ$ та для $n_2 = 1,0$, який, наприклад, для оптичного скла складе $41^\circ 8' 22''$, а для полікарбонату кут $\alpha_{пред} = 39^\circ 07' 04''$. Технічно можливо виготовити мікропризмові структури з будь-яким кутом заломлення α . Однак, для створення практичних пристроїв, що зміщують зображення, фізичний зміст мають лише кути, які менші граничного. Тому надалі в розрахунках обмежимося кутами $\alpha < 40^\circ$.

Теоретичні засади та методи виготовлення мікропризмових світлоповертачів та мікропризмових структур Френеля практично однакові. Різниця полягає лише в тому, що в першому випадку головною метою є досягнення максимального коефіцієнта світлоповертання $R(\varphi_0)$, а в другому необхідно забезпечити зміщення променя світла на строго визначений кут з максимально якісним зображенням при мінімальних витратах світлового потоку.

У разі формування мікрорельєфу методом алмазного різання [5], розрахунки витрат світлового потоку при проходженні променя через мікропризмові структури необхідні, перш за все, для вибору оптимальних кутів заточення алмазного ріжучого інструменту. Кут заточення різця γ задається величиною кута заломлення мікропризми α та другого кута β , що визначає кут скосу призми (рис. 4). Кут β зручно відраховувати від нормалі до утворюючої поверхні мікропризми, оптимальне значення кута β не перевищує $10-12^\circ$, що залежить від кроку нарізки W та глибини мікрорельєфу D .

Потік світла, що пройшов через зону мікропризми A_2A_3 , за умови $\beta < 10-12^\circ$, зазнає повне внутрішнє відбиття від бокової грані мікропризми й тому розсіюється всередині призми. Відповідний коефіцієнт k_1 витрат випромінювання за рахунок екранування частини світлового потоку боковою гранню мікропризми, можна визначити як відношення потоку A_2A_3 до всього падаючого на мікропризму потоку A_1A_3 .

Легко визначити, що:

$$W = A_1A_3 = A_1A_2 + A_2A_3,$$

$$D = A_1A_2 \operatorname{tg} \alpha,$$

$$A_2A_3 = D \operatorname{tg} \beta = A_1A_2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta,$$

звідки:

$$k_1 = A_2A_3 / A_1A_3 = (\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta) / (1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta), \quad (4)$$

$$D = W \operatorname{tg} \alpha / (1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta). \quad (5)$$

З використанням (4), (5) для кожного значення кута заломлення мікропризми α легко отримати співвідношення між кроком нарізки W , кутом скосу призми β та глибиною рельєфу D . Остаточні значення зазначених параметрів визначаються з умов оптимальності процесу пресування або литва під тиском при тиражуванні кінцевих виробів.

Коефіцієнт витрат випромінювання k_2 , пов'язаний із внутрішнім відбиттям світлового потоку A_1A_2 від заломлюючої грані мікропризми, для різних кутів α визначався знову з використанням формул Френеля [3], які з урахуванням (4), (5) можна записати наступним чином:

$$k_2 = 0,5 \{ \operatorname{tg}^2(\varphi) / \operatorname{tg}^2(2\alpha + \varphi) + \sin^2(\varphi) / \sin^2(2\alpha + \varphi) \}. \quad (6)$$

Для розрахунку додаткових втрат випромінювання, пов'язаних із прямим відбиттям світлового потоку від грані A_1A_3 мікропризми, застосуємо наближені формули Френеля [3] для нормального падіння променів:

$$k_3 = \{ (n_1 - n_2) / (n_1 + n_2) \}^2. \quad (7)$$

Наприклад, для полікарбонату ($n_1 = 1,585$) у повітрі ($n_2 = 1,0$) коефіцієнт відбиття k_3 для однієї заломлюючої грані дорівнює 5,12 %. Для поліуретану ($n_1 = 1,50$) коефіцієнт відбиття $k_3 = 4,00$ %.

При розрахунках сумарних витрат випромінювання в мікропризмах усі три коефіцієнти k_1 , k_2 та k_3 помножуються. Ці значення сумарних витрат випромінювання необхідно враховувати при проектуванні практичних мікропризмових пристроїв зсуву зображень.

Зменшення витрат світлового потоку шляхом геометричної оптимізації рельєфу є одним із напрямків підвищення якості мікропризмових елементів. При створенні світлоповертальних пристроїв для офтальмології виключно важливим є досягнення максимальної якості оптичних поверхонь [7]. Це можна здійснити лише за рахунок надвисокої точності відтворення кутових і лінійних розмірів під час виготовлення та тиражування мікропризмових елементів. Виготовлення мікропризмових світлоповертальних пристроїв методом алмазного різання [5] складається з декількох етапів:

- виготовлення спеціального ріжучого інструменту;
- виготовлення майстер-штампа (оригіналу);
- виготовлення методом гальванопластики робочої нікелевої матриці;
- виготовлення мікропризмових копій на полімерних матеріалах (полікарбонат, поліметилметакрилат тощо).

Якість оптичних поверхонь, у першу чергу, забезпечується високими властивостями ріжучого інструменту, за допомогою якого виготовляється майстер-штамп. Заточка необхідного кута різання спеціального ріжучого інструменту здійснюється на модернізованому станку тонкого алмазного точіння з лазерною системою виставлення різця та поворотною голівкою з високоточними лімбами. Грані виготовленого різця відповідають 14-му класу чистоти, максимальне відхи-

лення кутових розмірів не перевищує 10 кутових секунд.

Виготовлення оригіналу здійснюється на модернізованому станку тонкого алмазного точіння. Необхідні кути нахилу ріжучих граней та кут канавки трикутного профілю контролюються за допомогою лазерних систем, які забезпечують виготовлення мікропризмових елементів, максимальне відхилення кутових розмірів котрих не перевищує 10 кутових секунд. Нарізка здійснюється шляхом послідовного заглиблення різця [10] до досягнення необхідної глибини рельєфу. Додержання необхідних параметрів процесу різання, зокрема, строгого додержання заданого кроку розташування трикутних канавок, забезпечується шляхом комп'ютерного регулювання процесу різання за спеціальною програмою.

Значне погіршення якості поверхні нарізаних мікроструктур спричинюють вібрації ріжучого інструменту під час процесу різання. Для мінімізації впливу вібрацій використовуються віброізоляційні опори. Шпиндель заточного станка, стіл поперечного переміщення, поворотний стіл і каретка станка для виготовлення майстер-штампів розміщуються на спеціальних аеростатичних підшипниках, осьове й радіальне биття яких не перевищують 0,1 мкм, радіальна й осьова жорсткість опор становить 6–8 кг/мкм.

Велике значення для отримання високоякісної оптичної поверхні має вибір матеріалу заготовки. Заготовка повинна мати певну твердість і в той же час бути достатньо пластичною, щоб при різанні не створювалися дефекти поверхні типу виривів, вм'ятин, задирів тощо, тому найчастіше використовуються сплави алюмінію типу В95 та бронзи типу БрКМЦ. Змазуючо-охолоджувальні рідини повинні мати високу текучість, що наближується до текучості керосину.

Виготовлення копій відбувається методом гарячого пресування та литтям під тиском, при цьому мікрорельєф оригіналу повністю відтворюється на полімерних копіях. На всіх етапах процесу здійснюється жорсткий контроль параметрів. Якість готових виробів контролюється візуально за допомогою мікроскопів, автоколіматорними методами та лазерами.

Висновки

Проведено аналіз світлоповертальних структур різних типів. Запропоновано методику оптимізації характеристик асиметричних світлоповертальних елементів при зміні кута освітлення його поверхні. Досліджено взаємозв'язок між геометричними та світлотехнічними характеристиками таких елементів, що є основою проектування світлоповертальних елементів різного призначення.

Запропоновано шляхи компенсування зниження ефективності світлоповертання існуючих світлоповертальних елементів унаслідок відбиття частини потоку світла від поверхні елемента та зменшення освітлення одиничної площини поверхні при незмінному потоці Φ_0 при розташуванні робочої поверхні елемента під кутом φ_0 до напрямку освітлення її потоком Φ_0 .

Розраховано витрати інтенсивності світлового потоку при проходженні променя через мікропризмові структури Френеля з оптичною силою $\Delta = 1\text{--}50$ PD, що відповідає мікрорельєфу з кутами мікропризм $\alpha = 1\text{--}35^\circ$. Для виготовлення мікропризмових матриць-оригіналів із такими кутами заломлення мікропризм досить трьох типів алмазних різців із кутами різання 60° , 70° та 90° . При цьому світлові

витрати при проходженні світлового пучка через мікропризмий рельєф у зазначеному діапазоні зміни оптичної сили мікропризм становить до 10 % внаслідок процесу екранування потоку та додатково до 10 % внаслідок відбиття променів від граней мікропризм.

Звичайно, неможливо детально проаналізувати всі існуючі в інституті напрямки досліджень у галузі створення сучасних мікропризмий світлоповертальних структур. Сьогодні досягнень менше ніж існує проблем, але Інститут проблем реєстрації інформації НАН України в цьому напрямку знаходиться практично на початку шляху, нові досягнення ще попереду.

1. US Patent 4,895,428. Int. Cl. G02B 5/124. High Efficiency Retroreflective Material / J.C.Nelson, S.Cobb; 1990, Jan. 23.

2. Петров В.В., Шанойло С.М., Крючин А.А., Антонов Е.Е., Кравець В.Г. Моделирование свойств асимметричных световозвращающих элементов // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2007. — Т. 9, № 2. — С. 17–25.

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

4. US Patent 5,831,767, G02B 5/122; G02B 5/124, Int. Cl. Asymmetric Cube Corner Article / Benson G.M., Smith K.I. (USA); «ЗМ» Company. — St. Paul, Minn. (USA); 1998, Nov. 3.

5. Пат. 71672 України, МКИ 7 G02B5/12. Спосіб виготовлення світлоповертальних елементів / В.В.Петров, С.М.Шанойло, Л.В.Бутенко, А.А.Крючин, В.М.Зенін, В.Д.Ковтун, О.К.Войтенко (Україна); ІПРІ НАН України. — № 2002108488; Заявл. 25.10.2002; Опубл. 15.12.2004. — С. 2.

6. Eckhardt H.D. Simple Model of Corner Reflector Phenomena // Applied Optics. — 1971, July. — Vol. 10, N 7.

7. US patent 6,531,205. Int. Cl. Fluorescent Yellow Retroreflective Sheeting / Buoni et al. («Avery Dennison Corporation», CA, USA). — March 11. — 2003.

8. Кравець В.Г., Петров В.В., Шанойло С.М., Крючин А.А., Зенін В.М., Гранат О.І., Числов Д.С. Спосіб виготовлення призмий світлоповертальних елементів з використанням люмінесцентних світлогенеруючих шарів. Заявка на винахід. — 2006.

9. Урмахер Л.С., Айзенштат Л.И. Оптические средства коррекции зрения. — М.: Медицина, 1990. — 256 с.

10. Пат. 74034 України, G02B5/124, B32B3/00. Спосіб виготовлення призмийподібних світлоповертальних елементів / В.В.Петров, С.М.Шанойло, О.І.Гранат, Л.В.Бутенко, А.А.Крючин, В.М.Зенін, В.Д.Ковтун, О.К.Войтенко, В.О.Заболотний, П.В.Майстренко, А.В. Ковальчук (Україна); ІПРІ НАН України. — № 2003076449; Заявл. 10.07.2003; Опубл. 17.10.2005. — 2 с.

Надійшла до редакції 20.08.2007