



КРЮЧИН

Андрій Андрійович – член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, заступник директора Інституту проблем реєстрації інформації НАН України

ВИСОКОПРЕЦИЗІЙНІ МІКРОПРИЗМОВІ СТРУКТУРИ І ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ШИРОКОМАСШТАБНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

За матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 28 лютого 2018 року

У доповіді наведено результати досліджень з розроблення мікропризмових структур та проаналізовано можливості їх використання у сучасних лазерних і світлодіодних системах і офтальмології. В Інституті проблем реєстрації інформації НАН України розробляють штучно сформовані і особливим чином структуровані середовища – метаматеріали, використання яких дозволяє створювати оптичні елементи та пристрої з унікальними властивостями. Метаматеріали синтезують введенням у природний матеріал різних періодичних структур з найрізноманітнішими геометричними формами. Сьогодні в прецизійному приладобудуванні, машинобудуванні та медицині дедалі більше застосовують високоточні деталі з мікроструктурованими поверхнями, наприклад лінзи і призми Френеля, світлоповертальні елементи.

Ключові слова: метаматеріали, мікропризми, світлоповертальні елементи, лікування косоокості, лінзи Френеля, оптичні дифузори.

Досвід, накопичений в Інституті проблем реєстрації інформації НАН України при створенні технології виготовлення оптичних носіїв інформації, технологічного комплексу виготовлення штампів для тиражування компакт-дисків, при проектуванні високоточних аеростатичних систем позиціонування та розробленні інтерферометричних систем контролю лінійних переміщень з нанометровою точністю, заклав технологічний базис для створення низки мікропризмових технологій [1]. Теоретичні основи розроблення мікропризмових технологій полягають у методах:

- розрахунку та проектування високоточних аеростатичних систем обертання дисків-оригіналів, позиціонування оптичних головок і різальних інструментів, інтерференційних і муарових оптичних датчиків лінійних переміщень;
- визначення впливу на роздільну здатність зображень величини призматичної дії мікропризм;

- розрахунку розподілу енергії ультразвукових коливань при зварюванні тонких листових полімерних матеріалів;
- врахування деформацій полімерних матеріалів у процесі термопресування та інжекційного лиття мікропризмових структур.

Створення цих технологій стало можливим завдяки тому, що Інститут має технологічну базу, яка була закладена ще під час будівництва інженерно-лабораторного корпусу і тепер постійно розширюється та оновлюється. До неї входять верстати з числовим програмним забезпеченням, розміщені на спеціальних фундаментах, шліфувальне обладнання, машини для інжекційного лиття пластмас, оптичне обладнання. Усе це сприяло вирішенню актуальної науково-технічної проблеми створення новітніх мікропризмових оптичних елементів для офтальмології, лазерних та світлодіодних систем.

Технології виготовлення та використання світлоповертальних елементів

Світлоповертальні елементи були запропоновані понад 50 років тому і виявилися досить ефективним засобом підвищення безпеки руху. Ці елементи, призначені для відбиття світлового променя в бік джерела світла з мінімальним розсіюванням, відомі сьогодні під різними назвами — катафоти, світлоповертальні елементи, ретрорефлектори. Загалом світлоповертання — це процес зміни напрямку променя строго на 180° в бік джерела освітлення. Перші світлоповертальні елементи було виготовлено зі скляних сфер, імплантованих до полімерної матриці. Катафоти, які використовують сьогодні, бувають найрізноманітніших типів: від плівки з мікропризматичними фракціями до структур, сформованих за допомогою спеціальних твердотільних інденторів, які моделюють кутові світлоповертачі. Однак найефективнішими серед них є мікропризмові світловідбивачі. Такі світлоповертачі працюють за рахунок відбивання світла від трьох взаємно перпендикулярних граней, сформованих у той чи інший спосіб на поверхні світлоповертача.

Головними критеріями якості призматичного відбивача є структура та якість призми, з яких він складається. Високоякісна призма має гострі, рівні краї та не пропускає світло, а повертає його назад до джерела світла [2].

Виготовлення таких елементів — це складний високотехнологічний багатоступеневий процес. Тільки кілька фірм у світі володіють технологією виготовлення мікропризмових світлоповертальних елементів. Свого часу взяти участь у створенні такої технології нашому Інституту запропонувало колишнє Міністерство промислової політики УРСР. Фахівці Інституту розробили оригінальний метод формування необхідної мікрорельєфної структури на металевій полірованій поверхні, так званий метод алмазного різання. На металевій полірованій поверхні за допомогою алмазних різців формується необхідна мікрорельєфна структура [3]. Наприклад, симетричні кутові відбивачі на утворюючій поверхні для катафота формуються трьома групами заглиблень, розміщених під кутом 120° . На перетині заглиблень утворюються мікропризми (рис. 1).

Вирішальне значення для отримання світлоповертальних елементів з визначеними характеристиками має форма заглиблень і кути нахилу їх стінок. До форми різця та кута його встановлювання під час нарізання рельєфу вносять спеціальні відхилення від номінальних значень для компенсації деформації форми пірамід у процесі термопресування або інжекційного лиття оптичних прозорих пластмас, з яких формують світлоповертальні елементи.

Окреме технологічне питання полягає у герметизації мікропризмової структури. Воно пов'язане з тим, що потрапляння вологи на поверхню мікропризми призводить до різкого зменшення коефіцієнта світловідбивання. В Інституті розроблено технологію ультразвукового зварювання підкладки з мікрорельєфною поверхнею з корпусом світлоповертального елемента. Спеціальний блок дозує і контролює енергію ультразвукових коливань, тому процес зварювання в масовому виробництві світлоповертачів відбувається повністю ідентично протягом багатьох циклів зварюван-

ня зі строго визначеними оптимальними параметрами зварювального процесу.

Для контролю якості полімерних структур створено спеціальне контрольно-вимірювальне обладнання. Оптичні стенди дозволяють вимірювати коефіцієнт світлоповертання катафотів і досліджувати кутову діаграму світловідбивання. Такі дані дають змогу не лише контролювати параметри виготовлених катафотів, а й визначати оптимальні параметри самого процесу виготовлення світловідбивачів.

В Інституті створено повний технологічний цикл виготовлення світлоповертальних елементів різного призначення та контролю їх світлотехнічних характеристик. Остання розробка в цьому напрямі, виконана в рамках конкурсного науково-технічного проекту НАН України в 2017 р., полягала у створенні технології та виготовленні експериментальної партії світлоповертальних елементів з восьмигранним корпусом для комунальної корпорації «Київавтодор».

Виготовлені згідно з цим проектом кругові бордюрні світлоповертачі не мають аналогів в Україні. Дослідні зразки таких катафотів кількістю 500 штук встановлено в жовтні–листопаді 2017 р. на площі Перемоги (рис. 2), Лівобережній площі, поблизу станції метро «Лівобережна» та на кількох перехрестях Шевченківського району м. Києва. Вони вже здобули високу оцінку фахівців-шляховиків.

Технологія виготовлення та використання мікропризм Френеля для діагностики та лікування косоокості

Ідею використання мікропризмових структур для діагностики та лікування косоокості у дітей було висунуто десять років тому академіком НАН України В.В. Петровим та членом-кореспондентом НАН України М.М. Сергієнком. Вона виявилася достатньо обґрунтованою та корисною, і офтальмологи сприйняли її насамперед як технічний засіб для точної діагностики показників косоокості. Розроблені та атестовані офтальмологічні набори для діагностики косоокості КК-42 дозволили на

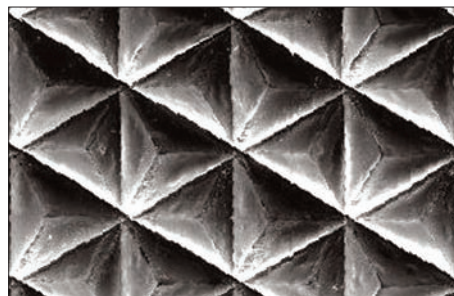


Рис. 1. Мікрорельєфна структура штампуння для тиражування симетричного світлоповертального елемента

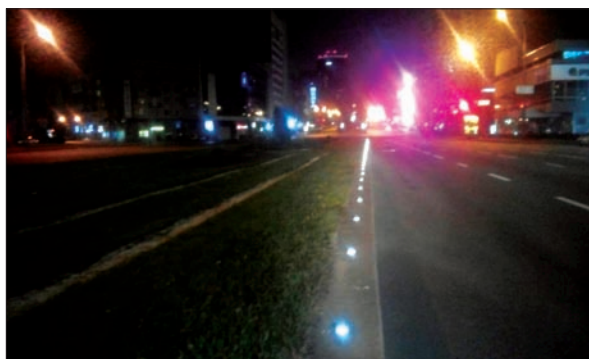


Рис. 2. Світлоповертальні елементи, встановлені на площі Перемоги в м. Києві. 2017 р.

першому етапі використання мікропризмових структур в офтальмології зменшити кількість необхідних операцій у процесі хірургічного лікування косоокості у дітей завдяки вищій точності діагностики. Ці офтальмологічні набори виготовляються безпосередньо в Інституті.

Діагностичні набори КК-42 містять 42 мікропризмових елементи з номіналами призматичної дії від 0,5 до 30 призмових діоптрій і дозволяють проводити визначення параметрів косоокості практично в усьому діапазоні кутів косоокості. Набори зареєстровані в Україні і дозволені для використання в офтальмологічній практиці [2, 4] (рис. 3).

Для оперативного визначення параметрів косоокості розроблено, атестовано та налагоджено виробництво в Інституті діагностичних лінійок з мікропризмовими елементами. Набори таких лінійок складаються з 5 окремих

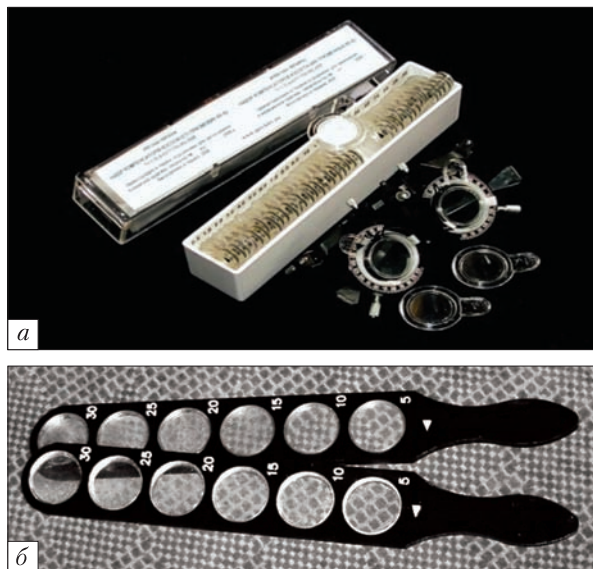


Рис. 3. Діагностичні набори КК-42 (а) і діагностичні лінійки з мікропризмовими елементами (б)

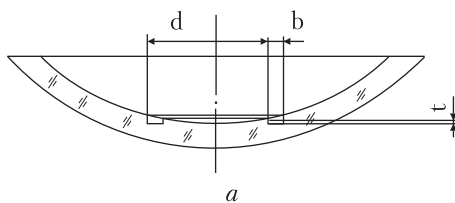


Рис. 4. Схема дії сферопризматичної лінзи (а) і зовнішній вигляд окулярів для лікування косоокості (б)

пристроїв для різних діапазонів призматичної дії від 1 до 55 діоптрій. Кожний номінал мікропризм у таких лінійках формується двома мікропризмами однакової призматичної дії, які встановлюються рельєфом одна до одної і фор-

мують повністю герметичний оптичний блок. Тому параметри призми у лінійках не змінюються навіть упродовж тривалої експлуатації пристроїв. У цьому полягає основна перевага наших лінійок над відомими світовими аналогами, в яких рельєф мікропризм є відкритим, а тому забруднюється і пошкоджується при використанні. Такі діагностичні лінійки із закритим рельєфом користуються великим попитом серед дитячих офтальмологів.

Дослідження, проведені відомими офтальмологами Київської міської клінічної офтальмологічної лікарні «Центр мікрохірургії ока» показали, що мікропризмові елементи можна використовувати не тільки для діагностики, а й для ефективного лікування та післяопераційної реабілітації косоокості дітей. Використання мікропризмових структур для лікування косоокості дітей дозволяє вирішити проблему безопераційного лікування дітей віком до 3 років — це вік, коли формується бінокулярний зір дитини. Проведення операцій у дітей віком до 3 років з анестезією небажане.

Для лікування косоокості з використанням мікропризмових структур було розроблено та впроваджено технологію виготовлення складних сферопризматичних окулярів. Створюють такі окуляри за рецептами лікарів-офтальмологів безпосередньо в Інституті за спеціально розробленою технологією ультразвукового з'єднання пластинки з мікрорельєфом з необхідною рефракційною сфероциліндричною лінзою. В окулярах мікропризми знаходяться у герметичній порожнині між сферичною лінзою та прозорою підкладкою мікропризмового елемента (рис. 4). Така конструкція окулярів виключає забруднення поверхні з мікропризмами і забезпечує тривалий час їх використання практично без зміни оптичних параметрів лінзи [5].

На сьогодні рецепти на виготовлення сферо-призматичних окулярів виписують понад 50 лікарів-офтальмологів провідних клінік України. Такі окуляри з виготовленими в Києві мікропризмовими елементами виробляють також в Узбекистані. Технологія лікування косоокості дітей з використанням мікропризмових

структур, виготовлених в Україні, сьогодні активно впроваджується в Китайській Народній Республіці. Зараз у кількох провінціях Китаю триває узгодження протоколів лікування з використанням сферо-призматичних окулярів [6].

Найважливішою перевагою створених в Інституті мікропризмових виробів над зарубіжними аналогами є те, що в них мікропризмовий рельєф не відкритий, як, наприклад, у гнучких призмах Френеля виробництва концерну 3М (США) та кількох компаній ФРН, а загерметизований, а отже, захищений від впливу навколишнього середовища. Такі мікропризмові структури не забруднюються під час експлуатації і тому гострота зору пацієнта не знижується. Крім того, висока точність номіналів призм та оптична якість створює всі умови для їх широкомасштабного застосування [5].

Слід зазначити, що проблемі впливу мікропризм на гостроту зору приділяють велику увагу. Для визначення впливу мікропризм на гостроту зорових образів, які спостерігає пацієнт у традиційних офтальмологічних обстеженнях з тестовими таблицями, в Інституті розроблено методику та створено обладнання для дослідження впливу призм на гостроту зору. Ці дані необхідні для підвищення точності діагностики дефектів зору на початкових стадіях захворювання органа зору, коли необхідно точно визначити внесок призм у зниження гостроти зорових образів у пацієнта [7].

Однією з причин зниження гостроти зору є хроматичні аберації. В Інституті розроблено і впроваджено оригінальний метод зменшення хроматизму мікропризмових структур, створено методики і контрольно-вимірвальне обладнання для контролю зниження гостроти зору мікропризмами, що дозволяє підвищити точність діагностики дефектів зору та значно зменшити вплив мікропризм на гостроту зорових образів, які спостерігає пацієнт у повсякденному житті. Для зменшення хроматизму запропоновано використовувати складні подвійні мікропризми, одна з яких виконує функцію рефракційної призми, а друга є дифракційною ґраткою, яка саме і зменшує кут хроматизму рефракційної призми [4].

Технологія виготовлення та використання оптичних дифузорів

Останнім часом ми зосередилися на вирішенні завдання зі створення оптичних дифузорів, які можна використовувати в системах стеження за рухомими об'єктами. Оптичні дифузори — це сучасні формувачі променя, здатні гомогенізувати його структуру, одночасно формуючи вихідний профіль інтенсивності та спосіб розподілу світла в просторі.

Дифузори є спеціальними оптичними елементами для забезпечення заданих параметрів розбіжності прямого і відбитого лазерного випромінювання, а також гомогенізації світлових променів. Гомогенізація лазерного випромінювання і формування пучка надзвичайно важливі для багатьох застосувань. Передусім це ті лазерні технології, в яких зображення маски потребує рівномірного розподілу інтенсивності випромінювання по всій площі маски, а отже, на всій площині обробки. На відміну від звичайного матового скла оптичні дифузори дозволяють керувати шириною індикатриси розсіювання світла для більш ефективного використання енергії світла від ламп розжарювання, світлодіодів, напівпровідникових лазерів та інших джерел. Оптичні дифузори широко використовують, зокрема, в проєкційних системах, рідкокристалічних дисплеях та багатьох інших пристроях, де виникає необхідність формування пучка освітлення із заданими параметрами. Оптичні дифузори є важливим елементом також у системах наведення, спостереження та керування рухомими об'єктами, оскільки забезпечують високий ступінь гомогенізації відбитого від об'єкта світлового потоку в індикатрисі розсіювання світла, що забезпечує високу точність і надійність роботи зазначених систем.

Відомі сьогодні конструкції оптичних дифузорів найчастіше виготовляють з використанням мікросфер, розміщених у полімерній матриці, а також методами формування 3D-структур на основі напівтонової літографії. Поширеними є голографічні дифузори на основі серії дифракційних елементів (ґраток),

орієнтованих під різними кутами в площині дифузора. Недоліками цих дифузорів є невисока точність і малий діапазон індикатриси розсіювання світла. При виготовленні дифузорів найчастіше використовують плівкові технології, тому дифузори мають обмежений температурний діапазон експлуатації, що погіршує експлуатаційні характеристики систем, у яких використовують зазначені дифузори.

Принципово новою конструкцією є жорсткі оптичні дифузори на основі двовимірного мікрорельєфу конічної форми, сформованого на плоскій утворюючій поверхні. Такі дифузори набагато ефективніші, ніж відомі аналоги, забезпечують високий ступінь гомогенізації розсіяного променя, дозволяють формувати заданий кут індикатриси розсіювання, можуть використовуватися в широкому діапазоні температур та довжин хвиль оптичного випромінювання, а отже, підвищувати точність і надійність систем спостереження, стеження та керування рухомими об'єктами. Використання оптичних дифузорів з конусними світлорозсіювальними елементами дає змогу також уникнути проблеми високоточного калібрування скляних мікросфер для отримання оптичних дифузорів з точно визначеними характеристиками. Запропоновано та виготовлено зразки таких оптичних конусних дифузорів з монолітного полімерного матеріалу (найчастіше з полікарбонату), які мають високу механічну міцність і забезпечують тривалий час надійної експлуатації [8].

Технологія виготовлення та використання фокусувальних лінз Френеля

Лінзи Френеля часто використовують як коліматорні та фокусувальні лінзи. Їх застосовують також як концентратори сонячної енергії в фотоелектричних модулях сонячних батарей космічних апаратів. Використання оптичних концентраторів дозволяє скоротити площі сонячних елементів і збільшити термін служби батарей, оскільки концентратори крім іншого захищають сонячні елементи від впливу космічної радіації. Основними перевагами лінз такого

типу є малі габарити, невелика маса та низька вартість. Використання кругових лінз Френеля дає можливість вирішувати також екологічні проблеми, пов'язані з усуненням обробки стекол, які містять важкі метали, зокрема свинець.

Кругова лінза являє собою плоский оптичний елемент, поверхня якого складається з необхідної кількості малих концентричних кільцевих кілець (канавок) заданого профілю. Кожна з канавок окремо діє як повертач променя. Виготовлені в Інституті кругові фокусувальні структури формуються системою плоских поверхонь, кожна з яких нахилена на певний розрахований кут і відхиляє світловий потік так, як це здійснюється звичайною лінзою. На плоских поверхнях легше забезпечити високу якість робочих поверхонь, яка необхідна для усунення оптичних аберацій і створення лінз високої оптичної якості. Зазначені плоскі нахилені поверхні легко формуються методом алмазного різання.

До таких лінз висувають надвисокі вимоги щодо якості поверхонь і точності виготовлення. Шорсткість структурованих поверхонь має бути не більшою за $Rz = 0,32$ мкм, допуск на основні лінійні розміри становить менш як 10 мкм, допуск на кути — $0,1^\circ$. За результатами контролю виготовлених в Інституті лінз Френеля показники якості є такими:

- шорсткість оброблених поверхонь $Rz = 0,15$ мкм;
- похибка кроку $R < 1$ мкм;
- похибка кутів профілю канавки — менш як $0,1^\circ$.

Розроблена технологія дає змогу виготовляти на замовлення як окремі лінзи Френеля методом алмазного різання, так і створювати методом гальванопластики нікелеві копії лінз з подальшим термопресуванням необхідної кількості лінз з оптичних пластиків [2].

Висновки

Наявне в Інституті високоточне технологічне обладнання дозволяє організувати масове виготовлення мікропризмових структур, зокрема дифузорів, спеціальних призмових окулярів і

світлоповерхтальних елементів різних типів, світлорозсіювальних панелей для систем світлодіодного освітлення.

Слід відзначити такі перспективні розробки в галузі мікропризмових технологій:

1) технології, що дозволяють зменшити зниження гостроти зору при використанні мікропризмових окулярів;

2) технології створення дифракційних ґраток для малогабаритних спектрофотометрів, призначених для контролю якості харчових продуктів;

3) створення лінз Френеля для концентраторів сонячної енергії у фотоелектричних модулях сонячних батарей різних типів;

4) створення світлорозсіювальних мікропризмових елементів для світлодіодних систем освітлення;

5) створення світлодіодних освітлювальних систем з використанням лінз Френеля з визначеним розподілом освітлення у робочій зоні.

Доповідач висловлює подяку представникам усіх організацій, які підтримували проведення досліджень та створення розробок Інституту в галузі мікропризмових технологій, і особливо Миколі Марковичу Сергієнку, який ініціював більшість наших робіт з використання мікропризмових технологій у сфері офтальмології.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

- Petrov V.V., Kryuchyn A.A., Kunitsky Yu.A., Rubysh V.M., Lapchuk A.S., Kostyukevich S.O. *Methods of nanolithography*. (Kyiv: Naukova Dumka, 2015).
[Петров В.В., Крючин А.А., Куницький Ю.А., Рубіш В.М., Лапчук А.С., Костюкевич С.О. *Методи нанолітографії*. К.: Наук. думка, 2015.]
- Antonov E.E., Kryuchyn A.A., Minglei Fu, Petrov V.V. et al. *Microprisms: optical parameters and monitoring*. (Kyiv: Akadempriodyka, 2015).
- Patent of Ukraine No. 74034. Butenko L.V., Kovtun V.D., Kovalchuk A.V., Petrov V.V., Zabolotnyi V.O., Maystrenko P.V., Shanoylo S.M., Voytenko O.K., Granat O.I., Zenin V.M., Kryuchyn A.A. Methods of manufacturing prism-like retro-reflective elements. Oct 17, 2005.
[Патент України № 74034. Бутенко Л.В., Ковтун В.Д., Ковальчук А.В. та ін. Спосіб виготовлення призмоподібних світлоповерхтальних елементів. Опубл. 17.10.2005. Бюл. № 10.]
- Petrov V.V., Kryuchyn A.A., Antonov E.E., Lapchuk A.S., Shanoylo S.M. Optical phenomena in microprism diagnostic set КК-42. Abstract Book "22nd General Congress of the International Commission for Optics" (ICO-22). Ed. R. Rodriguez-Vera, R. Diaz-Uribe. 15-19 August 2011, Puebla, Mexico. P. 234-235.
- Petrov V.V., Antonov E.E., Kryuchyn A.A., Shanyolo S.M. Optical characteristics of traditional elastic and new hard microprisms. *Data Recording, Storage & Processing*. 2015. **17**(1): 3.
[Петров В.В., Антонов Е.Е., Крючин А.А., Шанойло С.М. Оптические характеристики традиционных эластичных и новых жестких микропризм. *Регистрация, зберігання і обробка даних*. 2015. Т. 17, № 1. С. 3–15.]
- Ming-lei Fu, Wei-jie Hu, Zi-chun Le, Manko D.Y., Antonov E.E., Kryuchyn A.A., Petrov V.V.. Design and Fabrication of Rigid Fresnel Prisms for Complex Treatment of Children Strabismus. *Acta Photonica Sinica*. 2017. **46**(11): 1123003.
- Antonov E.E., Rikov S.O., Mellina V.B., Aleyeva N.M. Influence of modified Fresnel microprisms on contrast sensitivity of the organ of vision. *Archive of ophthalmology*. 2017. **5**(1): 44.
[Антонов Е.Е., Риков С.О., Мелліна В.Б., Алеєва Н.М. Вплив модифікованих мікропризм Френеля на контрастну чутливість органу зору. *Архів офтальмології*. 2017. Т. 5, № 1. С. 44–49.]
- Patent of Ukraine No. 123591. Petrov V.V., Britsky O.I., Shanoylo S.M., Antonov E.E., Kryuchyn A.A., Kosiak I.V., Zavorotnyi A.O., Bilobrov M.M., Lysianskyi M.M., Baranenkova V.P. Method of manufacturing an optical diffuser: pat. on utility model Ukraine: IPC G 03F7/20 (2006.01); Filed: Nov 15, 2017; Publication Date Feb 26, 2018. Bull. No. 4.
[Патент України № 123591. Петров В.В., Брицький О.І., Шанойло С.М. та ін. Спосіб виготовлення оптичного дифузору: пат. на корисну модель Україна: МПК G 03F7/20 (2006.01); заявл. 15.11.17; опубл. 26.02.18. Бюл. № 4.]

A.A. Kryuchyn

Institute for Information Recording of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

PRECISION MICROPRISMAL STRUCTURES AND PERSPECTIVES
OF THEIR LARGE-SCALE APPLICATION

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine,
February 28, 2018

The results of researches on development of microprismal structures are presented and an analysis of possibilities of their use in modern laser and light-emitting diode systems and ophthalmology is conducted. The Institute of Information Recording of NAS of Ukraine is developing artificially formed and specially structured environments – metamaterials, the use of which allows the creation of optical elements and devices with unique properties. Metamaterials are synthesized by introducing into the natural material of different periodic structures with a wide variety of geometric shapes. Today, precision parts with microstructured surfaces, for example, Fresnel lenses and prisms, retro-reflective elements are increasingly used in precision instrumentation, engineering and medicine.

Keywords: metamaterials, microprisms, retrorefraction elements, strabismus treatment, Fresnel lenses, optical diffusers.