

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-12>

УДК 621.396.969.1

СТЕПАНОВ Михайло

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0001-6376-4268>

e-mail: [2m.stepanov@gmail.com](mailto:2m.stepanov@gmail.com)

ДЯЧЕНКО Радомир

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

e-mail: [radik\\_dyachenko@ukr.net](mailto:radik_dyachenko@ukr.net)

## ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ МІКРОДЗЕРКАЛ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ДАВАЧА ПРИСКОРЕННЯ З ІМПУЛЬСНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ОПТИЧНОГО ПОТОКУ

У даній статті розглядаються три типи мікродзеркал для оптичних системи волоконно-оптичного давача прискорення з імпульсною модуляцією інтенсивності оптичного потоку. Мікродзеркало, створене лазерним гравіюванням; випукле мікродзеркало, отримане шляхом полірування металевго стержня; та циліндричне увігнуте мікродзеркало, створене за допомогою відбитка оптичного волокна. Дослідження фокусується на аналізі якості відбиття світла кожним типом дзеркала та їх практичної придатності в оптичних системах. Висновки базуються на експериментальних даних та аналізі характеристик отриманих сигналів.

Ключові слова: мікродзеркало, оптична система, волоконний світловод, циліндричне мікродзеркало

STEPANOV Mykhailo, DIACHENKO Radomyr

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## DESIGN AND MANUFACTURING OF MICROMIRRORS FOR A FIBER-OPTIC ACCELERATION SENSOR WITH PULSE MODULATION OF OPTICAL FLOW

This work examines three types of micro-mirrors for optical systems of a fiber-optic accelerometer with pulse modulation of optical flow intensity. A micro-mirror created by laser engraving; a convex micro-mirror obtained by polishing a metal rod; and a cylindrical concave micro-mirror, created using an imprint of optical fiber. The research focuses on analyzing the quality of light reflection by each type of mirror and their practical applicability in optical systems. Conclusions are based on experimental data and analysis of the characteristics of the obtained signals. Micromirrors have become an integral part of modern optical and optoelectrical systems, opening new horizons in the precise control of light beams. Their versatility allows them to be used in a variety of contexts, from optical arrays for laser guidance to space missions where they contribute to Earth observations from the International Space Station and other satellites. Particular attention is paid to the development of micromirrors with controlled three-dimensional curvature, which can not only redirect, but also separate light beams in space. Laser engraving provides high-precision processing capabilities suitable for the production of such micromirrors. The study created a glass-based micromirror with two orthogonal etched lines. In our study, we examined three types of micromirrors: laser-etched, cylindrical convex, and cylindrical concave to determine their effect on optical signal quality. Micromirrors produced by laser engraving are cost-effective and easy to manufacture. The concave cylindrical micromirror concentrates the light beam, optimizing the signal-to-noise ratio and reducing the possibility of errors. On the other hand, a convex micromirror scatters light but can theoretically improve the signal-to-noise ratio under certain conditions. Selecting the optimal micromirror requires analysis of experimental data.

Keywords: micro-mirror, optical system, fiber optic, cylindrical micro-mirror

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Мікродзеркала стали невід'ємною частиною сучасних оптичних та оптоелектричних систем, відкриваючи нові горизонти в точному керуванні світловими променями. Їх універсальність дозволяє застосовувати їх у різних контекстах: від оптичних масивів для лазерного керування [1], [2], до космічних місій, де вони сприяють спостереженням Землі з Міжнародної космічної станції та інших супутників [3]. Особлива увага приділяється розробці мікродзеркал з контрольованою тривимірною кривизною, які можуть не лише перенаправляти, але й розділяти світлові пучки у просторі [4], [5].

Однак для деяких задач необхідні мікродзеркала особливих параметрів. Такі мікродзеркала необхідні для розробки волоконно оптичного давача прискорення з імпульсною модуляцією інтенсивності оптичного потоку описаного в [6], схема роботи якого описана на рис. 1.

В якості джерела випромінювання використовується лазерний діод для генерації світлового пучка, який направляє через циркулятор до одномодового волоконного світловода (ВС). Один кінець якого закріплено на нерухомому кронштейні, а інша проходить через інерційну масу (ІМ), яка в робочому режимі рухається навколо ОZ. При нерухомому положення інерційної маси вісь ОZ співпадає з ВС. Електромагніт, керований мікроконтролером, ініціює рух інерційної маси. Мікродзеркало, розташоване під незакріпленим кінцем ВС та представляє собою дві ортогональні відбиваючі поверхні. Відбите від мікродзеркала світло повертається до волокна та далі до фотодетектора, де сигнал перетворюється і аналізується за допомогою аналого-цифрового перетворювача, осцилографа та комп'ютера.

Мікродзеркала відіграють важливу роль у формуванні оптичного сигналу, забезпечуючи точне відбивання світла. Якість відбивання впливає на вимірювання прискорення. У нашому дослідженні ми розглянули три типи мікродзеркал: виготовлене лазерним гравіюванням, циліндричне випукле та циліндричне ввігнуте для щоб визначення їх впливу на якість оптичного сигналу.



Рис. 1. Схема роботи волоконно оптичного давача прискорення з імпульсною модуляцією інтенсивності оптичного потоку.

Мікродзеркала, отримані методом лазерного гравіювання, відрізняються вартісною ефективністю та виробничою простотою. Ввігнуте циліндричне мікродзеркало концентрує світловий промінь, оптимізуючи відношення сигнал/шум і зменшуючи можливість похибок. З іншого боку, випукле мікродзеркало розсіює світло, але може теоретично покращити відношення сигнал/шум при певних умовах. Вибір оптимального мікродзеркала вимагає аналізу експериментальних даних.

#### Аналіз досліджень та публікацій

##### Лазерне гравіювання

Лазерне гравіювання надає можливість високоточної обробки, підходящої для виготовлення таких мікродзеркал [1-5]. У дослідженні було створено мікродзеркало на скляній основі з двома ортогональними гравіюваними лініями (Помилка! Джерело посилання не знайдено.2).

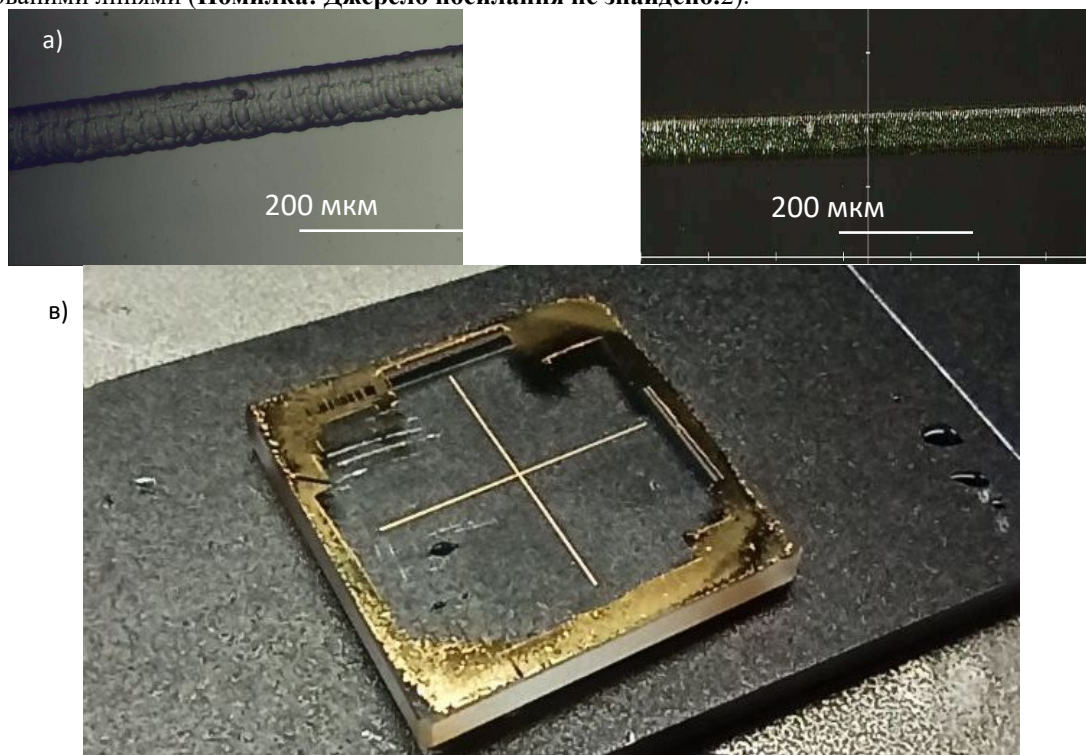


Рис. 1. Мікродзеркала виготовлені методом лазерного гравіювання. а) Зображення з мікроскопу отриманого заглиблення. б) Заглиблення після покриття відбиваючого шару. в) завершена основа з мікродзеркалами

Отримані за допомогою лазерного гравіювання заглибини мають розміри 100 мкм в ширину та 50 мкм в глибину, що дозволяє оптимально відбивати світловий промінь. Для підсилення відбиваючих властивостей та покращення оптичних характеристик, поверхня дзеркала після гравіювання була покрита золотим шаром за допомогою методу PVD (фізичне випаровування у вакуумі). Цей метод нанесення забезпечує рівномірне покриття та відмінну адгезію металу до поверхні, що гарантує стабільність мікродзеркала в робочому середовищі. Проте, метод лазерного гравіювання, хоч і високоточний, має свої особливості та потенційні проблеми. Основним викликом є контроль потужності лазера. Нерівномірність випромінювання, а також потенційні неоднорідності в матеріалі, можуть призвести до створення поверхні, яка не є ідеально гладкою. Зокрема, можуть утворюватися опуклі сферичні ділянки, як це ілюстровано на рисунку 2а. Покриваючи таку нерівну поверхню золотим шаром (як показано на рисунку 2б), можна збільшити кількість відбитого світла. Однак, через ці нерівності, відбите світло може мати різну інтенсивність в різних місцях, що ускладнює інтерпретацію отриманих даних. Рис. 3 демонструє відбиті імпульси від використання таких дзеркал [6-8].

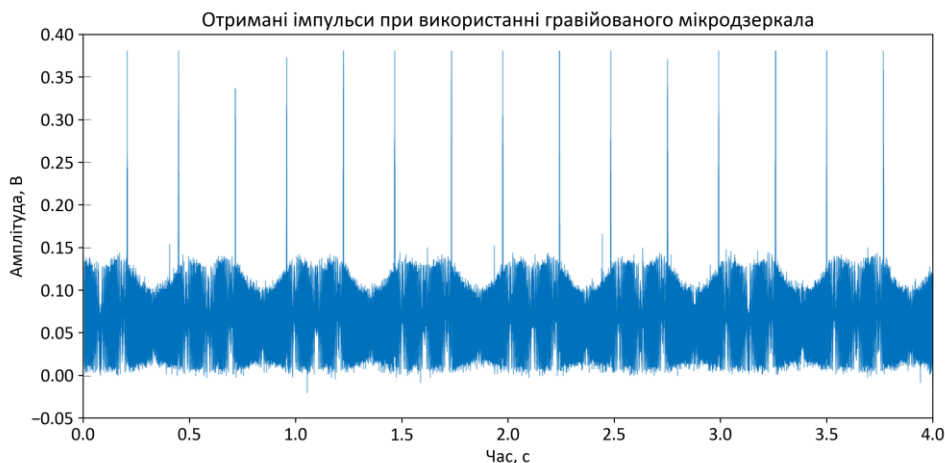


Рис. 2. Послідовність імпульсів утворених в результаті відбиття від мікродзеркала виготовленого шляхом гравіювання поверхні скла з подальшим покриттям відбиваючого шару

Після детального вивчення відбитих імпульсів стає очевидним, що характер оптичного сигналу істотно змінюється через нерівності на поверхні дзеркала. Кожна випукла ділянка на дзеркалі відбиває світловий промінь під унікальним кутом, внаслідок чого формуються додаткові імпульси. Це явище можна спостерігати на рис. 5.

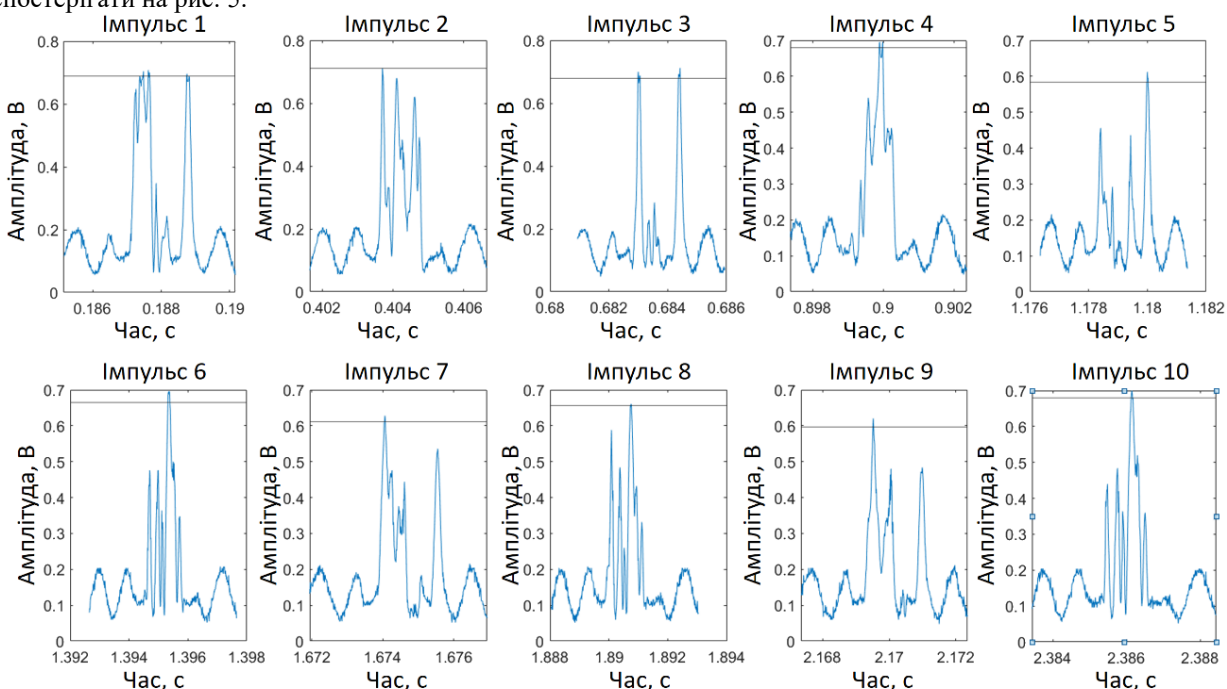


Рис. 3. Імпульси утворені в результаті відбиття від мікродзеркала виготовленого шляхом гравіювання поверхні скла з подальшим покриттям відбиваючого шару

Ефект множинних імпульсів, викликаний нерівностями на поверхні дзеркала, справді ускладнює аналіз часових інтервалів між ними. Це може призвести до зниження точності вимірювань прискорення. Враховуючи це, є необхідність розробки альтернативних методів виготовлення мікродзеркал, що забезпечать більш гладку та однорідну поверхню, для забезпечення вищої точності акселерометра.

#### Випукле мікродзеркало

Використання випуклого мікродзеркала, отриманого шляхом полірування металевго стержня, є альтернативним методом створення відбиваючої поверхні. Інший подібний підхід передбачає використання волоконного світловоду як основи для випуклого дзеркала, завдяки його природній формі та гладкості. Для оптимізації відбиваючих властивостей, поверхня волоконного світловоду була покрита шаром золота. На рисунку 6 показано виготовлені основи з вбудованими дзеркалами.

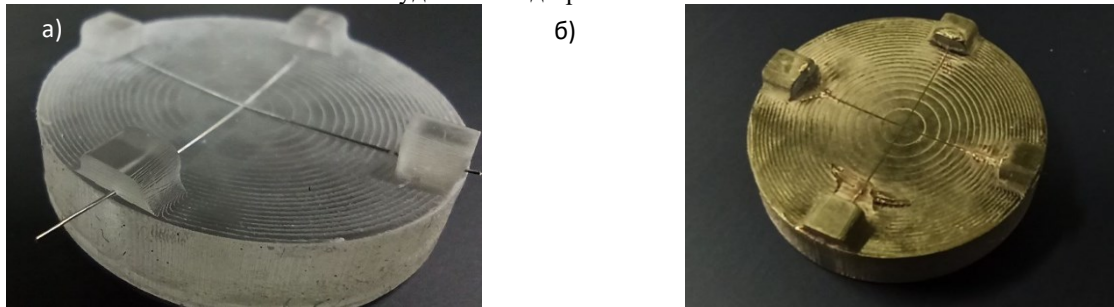


Рис. 4. Випуклі мікродзеркала: а) експериментальний зразок полірованого металевго стержня вмонтований в підготовлену основу; б) основа з волоконним світловодом в якості мікродзеркала

Під час дослідження випуклого мікродзеркала виявилися певні труднощі. В отриманих результатах відбивання світла було помічено відхилення від теоретичних очікувань. Замість передбачуваної плавної зміни амплітуди відбитого сигналу, було зафіксовано нерівномірний розподіл інтенсивності, з характерними мінімумами та максимумами, як показано на рис. 7.

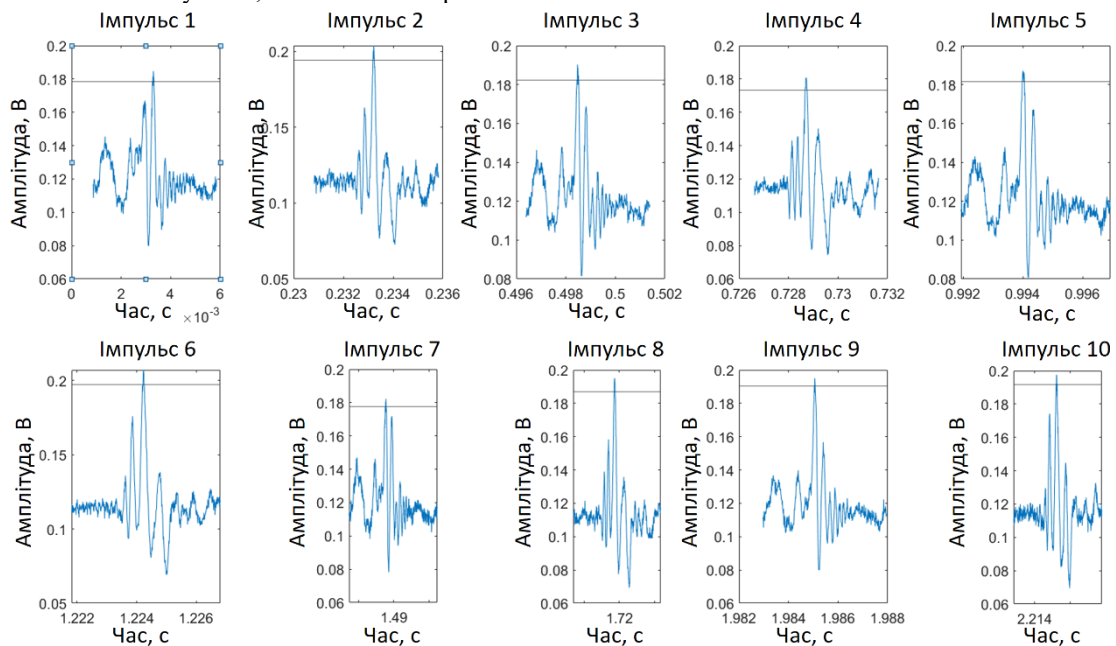


Рис. 5. Імпульси утворені в результаті відбиття від випуклого мікродзеркала

Такі результати, ймовірно, виникли через інтерференційні ефекти світла [9], коли первинний відбитий світловий пучок взаємодіє з частиною світла, що повертається після відбиття від дзеркала. Ця проблема стає виразною, коли інтенсивність первинного відбиття наближається до інтенсивності поверненого світла. З урахуванням цих відхилень, виникає потреба у вдосконаленні методів створення мікродзеркал, які можуть забезпечити більш надійне відбиття.

#### Увігнуте мікродзеркало

Для забезпечення оптимальної форми відбитого оптичного сигналу, було запропоновано використання циліндричного увігнутого мікродзеркала з гладкою поверхнею та відповідною кривизною. Такий підхід передбачає створення дзеркала з мінімальною шорсткістю, що є меншою за довжину хвилі використовуваного світлового джерела. Для реалізації цього підходу, необхідно розробити детальний проект



оптичної системи, визначивши ключові параметри дзеркала. В роботах [5], [7] детально описаний принцип відбиття від циліндричного мікродзеркала. Увігнуте циліндричне дзеркало, завдяки своїй особливій геометрії, модулює розподіл відбитого світлового пучка. Ця унікальна кривизна створює відбиття, яке можна розглянути з двох проєкцій. З точки зору фронтальної проєкції, світло фокусується в одній точці, тоді як при розгляданні виду збоку формується гаусівський розподіл інтенсивності.

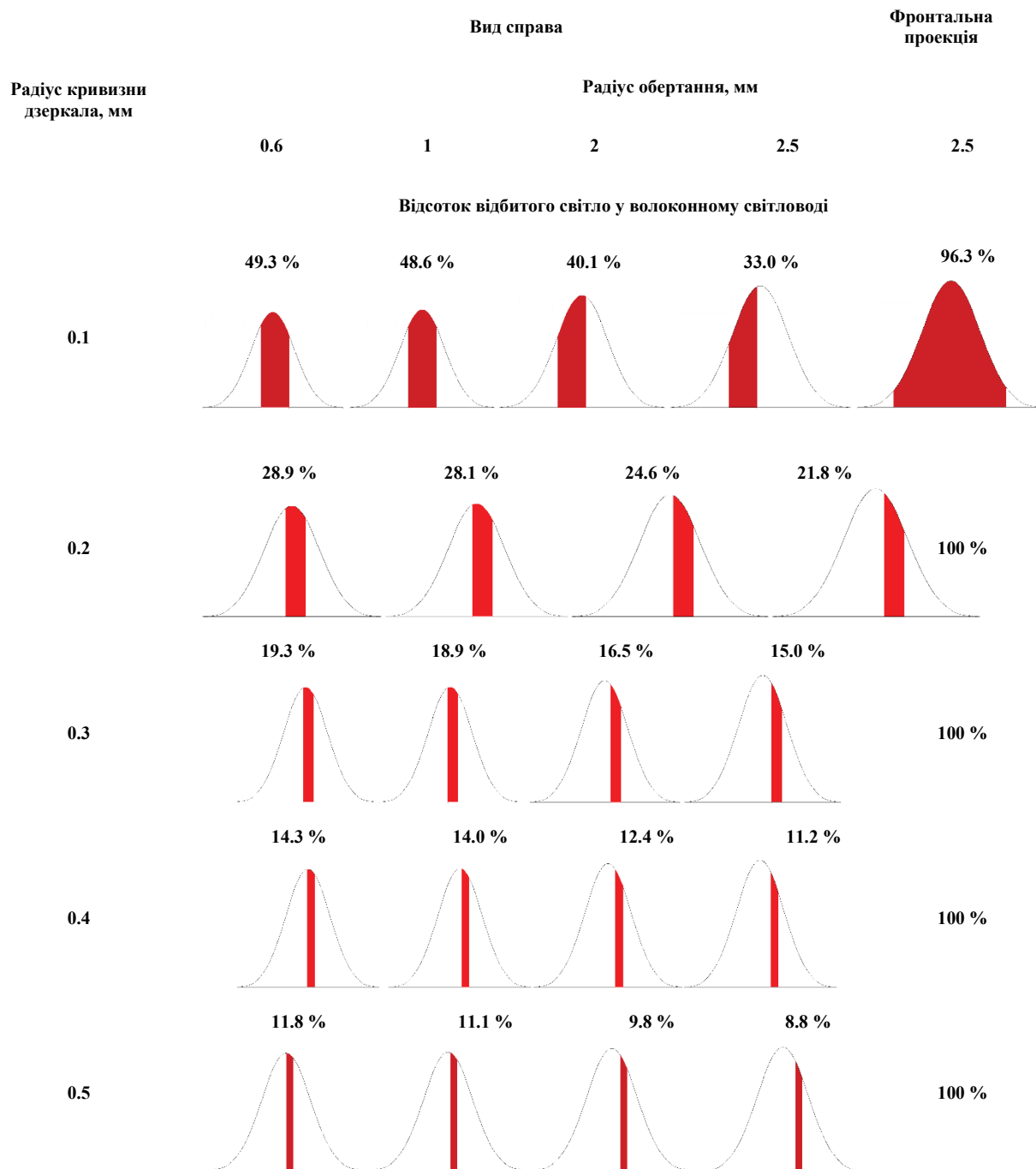


Рис. 6. Залежність відбитого світла від параметрів увігнутого циліндричного мікродзеркала

В залежності від радіусу обертання ВС в описаному давачі прискорення, відсоток відбитої частини світла, яка потрапила назад до ВС, буде змінюватись. Змінюючи глибину дзеркала можна отримати випадок, щоб при радіусі обертання  $R=1$  мм, фокусна вісь мікродзеркала співпадала з кінцем оптичного волокна. Це забезпечує оптимальне відбиття світлового пучка.

Аналізуючи відбиття світла дзеркал різного діаметру (рис. 7), було виявлено, що найефективніше відбивання досягається при використанні дзеркала з радіусом кривизни 0.1 мм. Проте, з урахуванням спостереження, що інтенсивність відбитого світла зростає при зменшенні радіуса дзеркала, можливе

подальше тонке налаштування його кривизни. Дослідження дозволило глибше зрозуміти характеристики різних дзеркал та їх взаємодію з оптичним сигналом. Висновок полягає в тому, що циліндричне увігнуте дзеркало з відповідно підібраними параметрами є найбільш оптимальним для задачі.

Щодо технології виготовлення такого дзеркала, було запропоновано метод, який базується на використанні оптичного волокна. Його відбиток може служити як форма для створення мікродзеркала з потрібною кривизною. Цей метод забезпечує високу точність та уніфікованість форми відбитих імпульсів, що критично для забезпечення точності давача прискорення. Для реалізації такого підходу необхідно розробити докладний протокол виготовлення дзеркала, забезпечуючи мінімальну шорсткість його поверхні.

### Виклад основного матеріалу

#### Виготовлення циліндричного увігнутого мікродзеркала

Для створення циліндричного увігнутого мікродзеркала було використано методику, що базується на формуванні відбитка від оптичного волокна (ВС). Цей метод було обрано через його потенційну здатність забезпечити точну кривизну дзеркальної поверхні (рис. 9а), яка відіграє ключову роль у якості відбитого сигналу. Процес виготовлення можна описати наступними кроками (рис. 8):

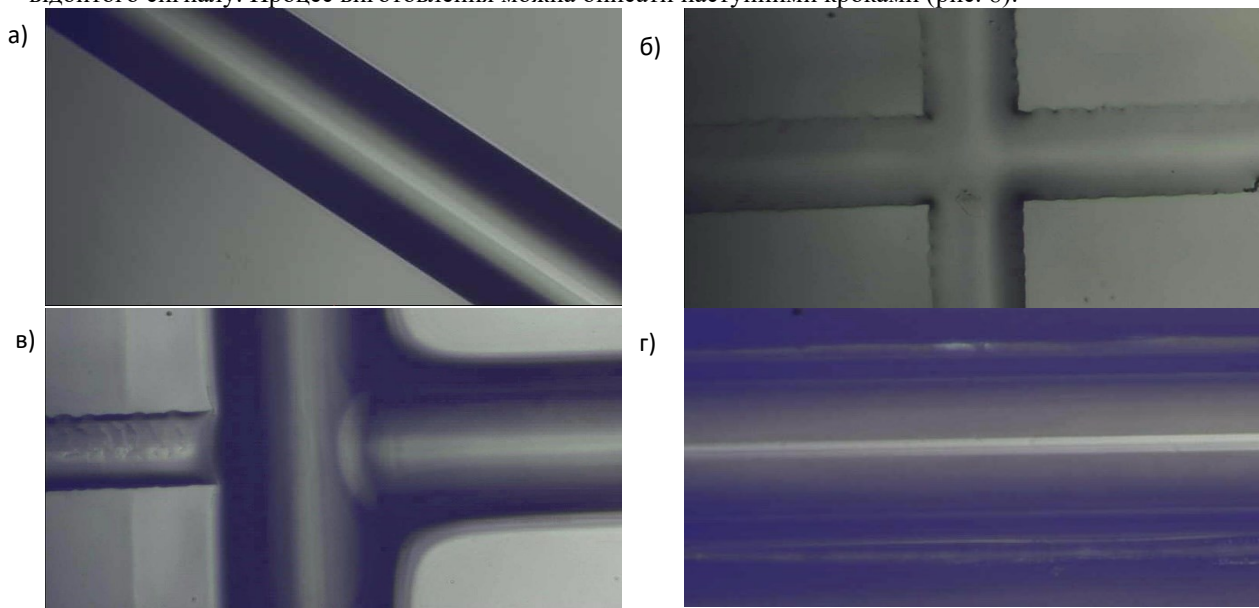


Рис. 7. Процес формування відбитку світловода для створення циліндричного мікродзеркала. а) волоконний світловод; б) заповнення щілини епоксидною смолою; в) розміщення ВС; г) готовий відбиток ВС

Після завершення процесу полімеризації фотополімерної смоли (див. рис. 9а), на підготовлену поверхню було нанесено акрилову суспензію (рис. 9б).

На полімерному підкладі за допомогою лазерного гравіювання були створені дві перпендикулярні лінії ~60 мкм та шириною ~150 мкм.

Створені канавки були заповнені фотополімерною епоксидною смолою, яка являється основою для подальшого формування мікродзеркал (рис. 8б).

Волоконний світловод було розміщено в смолі так, що його зовнішня поверхня слугувала матрицею для створення потрібної форми мікродзеркала (рис. 8в).

Цей підхід дозволив отримати мікродзеркало з потрібною кривизною та геометрією (рис. 8г), що відповідає вимогам для отримання якісного відбитого сигналу.

Після чого, оптичне волокно було обережно вилучено (рис. 9в), забезпечуючи, щоб під час цього процесу не було пошкоджено формовану структуру мікродзеркала. Для підвищення відбиваючих властивостей, поверхня мікродзеркала була оброблена золотом за методом фізичного осадження з пари (PVD). Метод PVD дозволяє наносити тонкі покриття на різні матеріали, перетворюючи цільовий матеріал на пару, яка потім осідає на поверхні об'єкта.

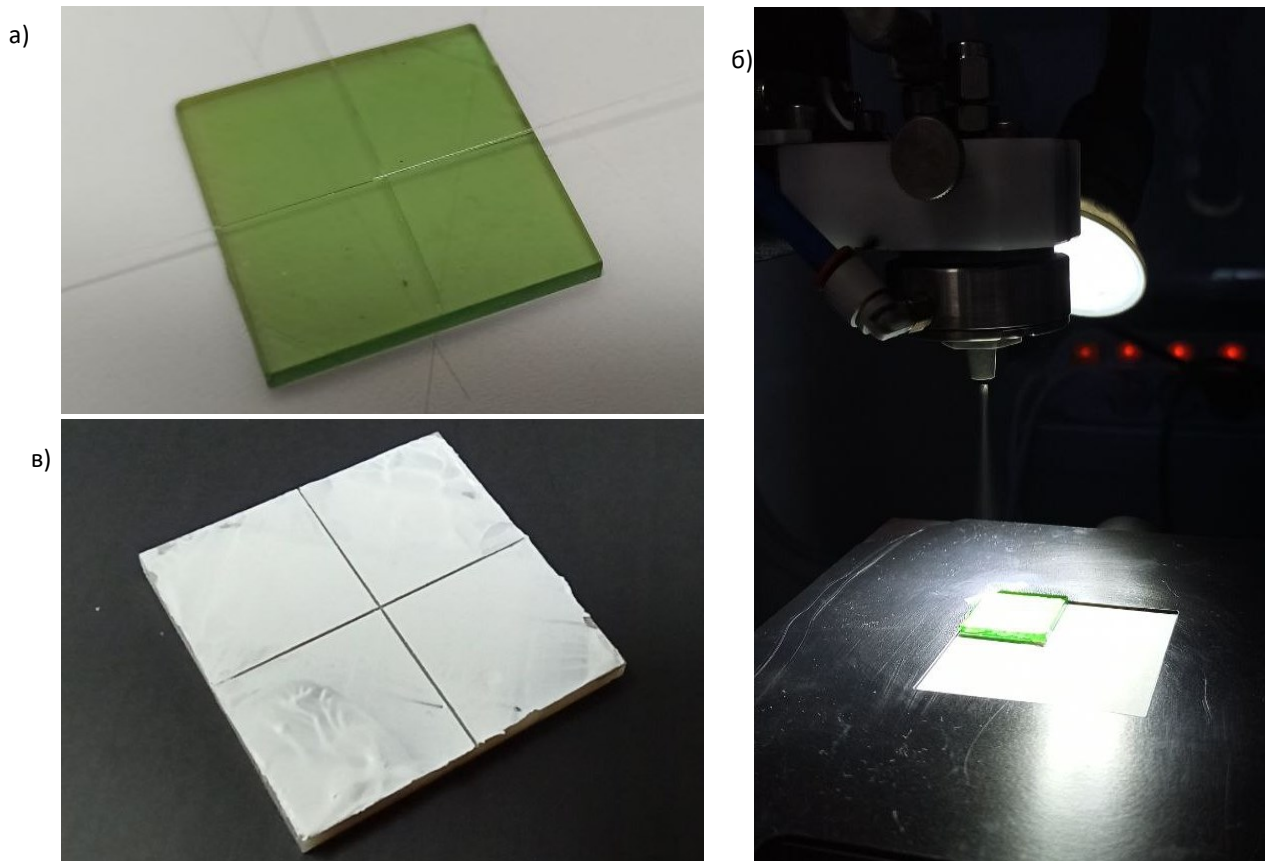


Рис. 8. Процес напилення акрилової суспензії на підготовлену основу. а) підготовлена основа; б) нанесення акрилового шару; в) видалення ВС з основи

Отримане таким чином покриття відзначається високою адгезією, стійкістю до корозії та зношування. Завдяки цьому, відбиваючі властивості мікродзеркала значно покращуються, що сприяє підвищенню точності вимірювань давача прискорення. Виготовлене мікродзеркало, як зображено на рисунку 10а, відзначається кривизною, що повторює форму ВС, із глибиною 50 мкм (див. рис. 10б). Застосування оптичного волокна як шаблону дозволило нам виготовити циліндричне дзеркало, яке відповідає специфікаціям для розробки давача. Це підтверджується аналізом послідовності імпульсів (рис. 10в), отриманих під час експериментальних випробувань на стенді, зібраному згідно з описаною схемою (рис. 1). Зареєстрований імпульс має характерну гауссівську форму, що підтверджується величиною  $R2$  при підгонці за допомогою гауссівської функції (див. рис. 10г).

В процесі дослідження було розглянуто три основних типи мікродзеркал для використання в оптичних системах. Мікродзеркало, створене лазерним гравіюванням, відзначається своєю економічністю та простотою виробництва. Однак його основний недолік полягає в потенційних нерівностях на поверхні, які можуть призвести до неоднорідної інтенсивності відбитого світла.

Випукле мікродзеркало, отримане шляхом полірування металевого стержня, або використання волоконного світловода як основу, має певні обмеження у практичних результатах відбивання світла, через явища інтерференції.

Останній розглянутий тип, циліндричне увігнуте мікродзеркало, створене за допомогою відбитка оптичного волокна, виявився найбільш перспективним. Цей метод дозволяє досягти необхідної точності кривизни дзеркальної поверхні, що є критично важливим для якості отриманого оптичного сигналу.

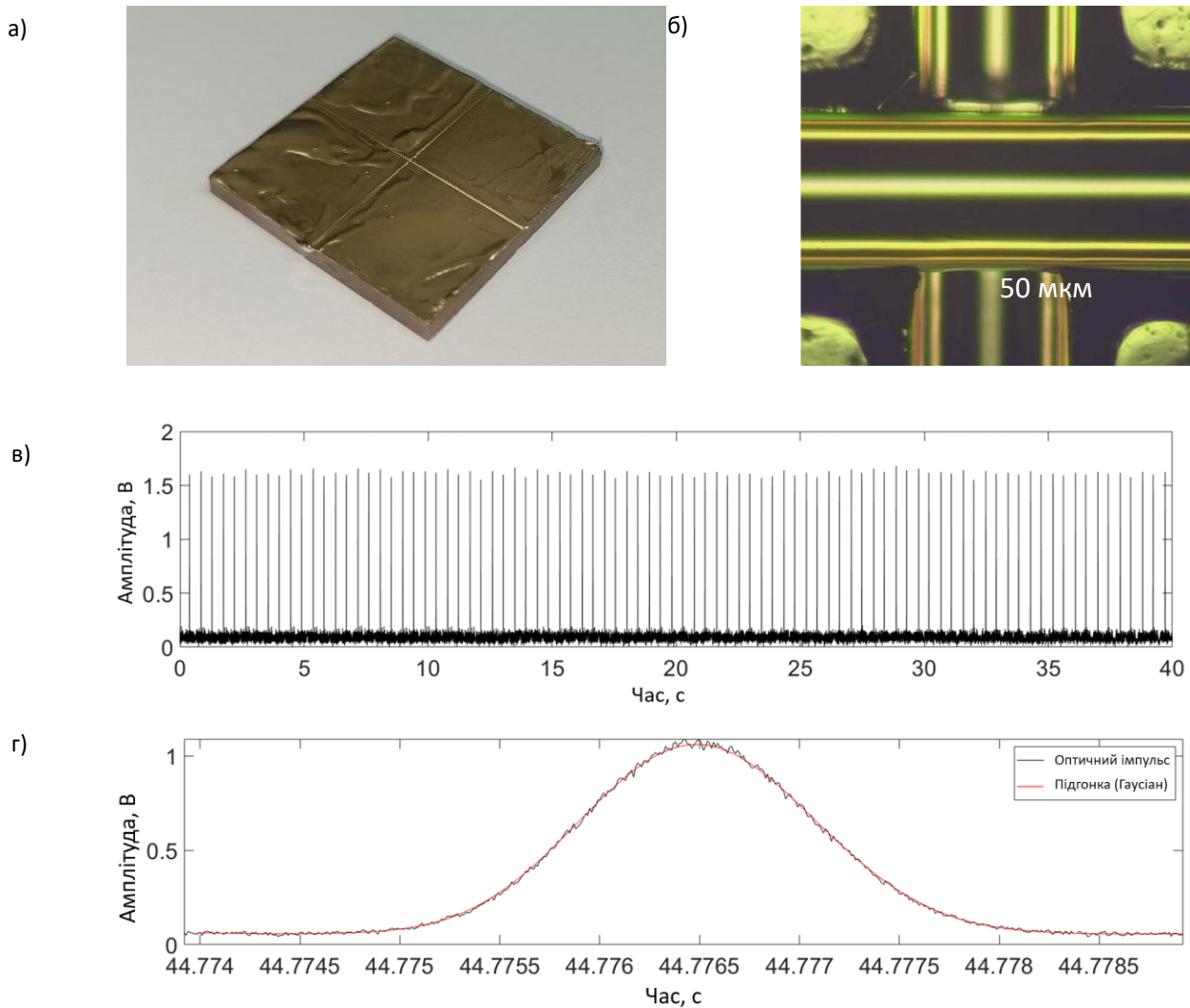


Рис. 9. а) Виготовлене мікродзеркало; б) Зображення мікродзеркал; в) послідовність отриманих імпульсів; г) одиничний імпульс та гауссівське наближення,  $R2 = 0,999$

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальшого розвитку у даному напрямі

У роботі досліджено три типи мікродзеркал для оптичних систем волоконно-оптичного акселерометра з імпульсною модуляцією інтенсивності оптичного потоку. Мікро-дзеркало, створене методом лазерного гравіювання; опукле мікродзеркало, отримане поліруванням металевго стрижня; і циліндричне увігнуте мікродзеркало, створене за допомогою відбитка оптичного волокна. Дослідження зосереджено на аналізі якості відбиття світла кожним типом дзеркал та їх практичному застосуванні в оптичних системах. Висновки зроблені на основі експериментальних даних та аналізу характеристик отриманих сигналів. Вибір оптимального мікродзеркала вимагає аналізу експериментальних даних який буде проведений в подальших роботах у цьому напрямі.

### Література

1. T. Mohammad, S. He, and R. Ben Mrad, "A MEMS Optical Phased Array Based on Pitch Tunable Silicon Micromirrors for LiDAR Scanners," *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 712–724, 2021, doi: 10.1109/JMEMS.2021.3092701.
2. W. Lubeigt et al., "Control of solid-state lasers using an intra-cavity MEMS micro-mirror," *2010 Int. Conf. Opt. MEMS Nanophotonics, Opt. MEMS Nanophotonics 2010*, vol. 19, no. 3, pp. 57–58, 2010, doi: 10.1109/OMEMS.2010.5672187.
3. B.-W. Yoo et al., "MEMS micromirror characterization in space environments," *Opt. Express*, vol. 17, no. 5, p. 3370, 2009, doi: 10.1364/oe.17.003370.



4. Y. M. Sabry, B. Saadany, D. Khalil, and T. Bourouina, "Silicon micromirrors with three-dimensional curvature enabling lensless efficient coupling of free-space light," *Light Sci. Appl.*, vol. 2, no. AUGUST, 2013, doi: 10.1038/lsa.2013.50.

5. V. Lien, Y. Berdichevsky, and Y. H. Lo, "Fabrication of concave micro-mirrors with programmable focal lengths using microfluidic capillary," *OSA Trends Opt. Photonics Ser.*, vol. 88, pp. 296–298, 2003.

6. П. Дем'яненко, Ю. Зінковський, "Волоконно-Оптические Датчики С Импульсной Модуляцией Оптического Потока," *Космічне Приладобудування*, vol. 21, no. 4, pp. 3–18, 2015.

7. Y. S. Ow, M. B. H. Breese, and S. Azimi, "Fabrication of concave silicon micro-mirrors," *Opt. Express*, vol. 18, no. 14, p. 14511, 2010, doi: 10.1364/oe.18.014511.

8. Boiko, J., Eromenko, O., Kovtun, I., & Petrashchuk, S. (2018, October). Effectiveness Improvement Method for Signal Processing in Optical Telecommunication. In 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T) (pp. 777-782). IEEE.

9. Бойко Ю. М., Єрмоєнко О. І., Коротун М. В. Механізми підвищення ефективності функціонування оптоелектронних пристроїв телекомунікаційних систем // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – №. 4. – С. 105-115.

#### References

1. T. Mohammad, S. He, and R. Ben Mrad, "A MEMS Optical Phased Array Based on Pitch Tunable Silicon Micromirrors for LiDAR Scanners," *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 712–724, 2021, doi: 10.1109/JMEMS.2021.3092701.

2. W. Lubeigt et al., "Control of solid-state lasers using an intra-cavity MEMS micro-mirror," 2010 Int. Conf. Opt. MEMS Nanophotonics, *Opt. MEMS Nanophotonics 2010*, vol. 19, no. 3, pp. 57–58, 2010, doi: 10.1109/OMEMS.2010.5672187.

3. B.-W. Yoo et al., "MEMS micromirror characterization in space environments," *Opt. Express*, vol. 17, no. 5, p. 3370, 2009, doi: 10.1364/oe.17.003370.

4. Y. M. Sabry, B. Saadany, D. Khalil, and T. Bourouina, "Silicon micromirrors with three-dimensional curvature enabling lensless efficient coupling of free-space light," *Light Sci. Appl.*, vol. 2, no. AUGUST, 2013, doi: 10.1038/lsa.2013.50.

5. V. Lien, Y. Berdichevsky, and Y. H. Lo, "Fabrication of concave micro-mirrors with programmable focal lengths using microfluidic capillary," *OSA Trends Opt. Photonics Ser.*, vol. 88, pp. 296–298, 2003.

6. P. Demianenko, Yu. Zinkovskiy, "Volonkonno-Optycheskiye Datchyky S Ympulsnoi Modulyatsyei Optycheskoho Potoka," *Kosmichne Pryladobuduvannya*, vol. 21, no. 4, pp. 3–18, 2015.

7. Y. S. Ow, M. B. H. Breese, and S. Azimi, "Fabrication of concave silicon micro-mirrors," *Opt. Express*, vol. 18, no. 14, p. 14511, 2010, doi: 10.1364/oe.18.014511.

8. Boiko, J., Eromenko, O., Kovtun, I., & Petrashchuk, S. (2018, October). Effectiveness Improvement Method for Signal Processing in Optical Telecommunication. In 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T) (pp. 777-782). IEEE.

9. Boiko J.M., Eromenko O.I., Korotun M.V. Means improve the efficiency of optoelectronic devices in telecommunication systems // Herald of Khmelnytskyi national university. *Tekhnichni nauky*. – 2016. – №. 4. – S. 105-115.