

Н.А. ДЬОМИНА, М.В. МОРОЗОВ, В.В. СОЛОДОВ, Л.В. ХАЛАНЧУК

ВІДБИТТЯ СВІТЛА ВІД ДИФРАКЦІЙНОЇ ГРАТКИ З ТРИКУТНИМ ПРОФІЛЕМ

Розглянута дифракція світла у випадку скалярного наближення хвильової оптики для відбивної ґратки з трикутним профілем. У випадку дифузно відбиваючої одновимірної шорсткої поверхні, її рельєф у першому наближенні можливо подати, як випадковий набір відбивних ґраток з трикутним профілем з нормальним (гауссовим) законом розподілу амплітуди та просторового періоду. Отримано умову для амплітуди та періоду дифракційної ґратки, за якою відсутнє повторне відбиття, і отримано залежність оптичної різниці ходу від амплітуди та просторового періоду трикутного профілю ґратки. Досліджено інтенсивність відбитої хвилі у залежності від параметрів рельєфу ґратки. Проведено вимірювання відносної інтенсивності (коефіцієнту відбиття) при нормальному освітленні для еталонних зразків шорсткої поверхні. Відносна інтенсивність відбитої хвилі у випадку нормального освітлення та відбиття використовується при розробці оптичного безконтактного експрес-методу вимірювання шорсткості поверхні для діапазону 0.05...0.25 мкм. Запропоновано оптичну схему вимірювання шорсткості, у якій також використовують зразки поверхні з відомою шорсткістю. Розглянуто також залежність інтенсивності відбитої хвилі від кута дифракції. У цьому випадку необхідно застосовувати чисельні методи інтегрування. Таким чином, вимірювання відносної інтенсивності нормально відбитої хвилі у фокальній площині об'єктива дає змогу визначити шорсткість дифузновідбивної поверхні. У випадку нелінійної реєстрації голографічних дифракційних ґраток гармонічний профіль може бути суттєво деформовано та наближається до трикутного. Тому для дослідження відбивних голографічних дифракційних ґраток та визначення їх дифракційної ефективності використовують модель із трикутним профілем штриха.

Ключові слова: відбивна дифракційна ґратка; трикутний профіль; дифракційна ефективність; шорсткість

Н.А. ДЕМИНА, Н.В. МОРОЗОВ, В.В. СОЛОДОВ, Л.В. ХАЛАНЧУК

ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА ОТ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ С ТРЕУГОЛЬНЫМ ПРОФИЛЕМ

Рассмотрена дифракция света в случае скалярного приближения волновой оптики для отражающей решетки с треугольным профилем. В случае диффузно отражающей одномерной шероховатой поверхности, ее рельеф в первом приближении можно представить как случайный набор отражающих решеток с треугольным профилем с нормальным (гауссовым) законом распределения амплитуды и пространственного периода. Получено условие для амплитуды и периода дифракционной решетки, для которого отсутствует повторное отражение, и получена зависимость оптической разности хода от амплитуды и пространственного периода треугольного профиля решетки. Исследована интенсивность отраженной волны в зависимости от параметров рельефа решетки. Проведено измерение относительной интенсивности (коэффициента отражения) при нормальном освещении для эталонных образцов шероховатой поверхности. Относительная интенсивность отраженной волны в случае нормального освещения и отражения используется при разработке оптического бесконтактного экспресс метода измерения шероховатости поверхности для диапазона 0.05...0.25 мкм. Предложена оптическая схема измерения шероховатости, в котором также используются образцы поверхности с заранее известной шероховатостью. Рассмотрена также зависимость интенсивности отраженной волны от угла дифракции. В этом случае необходимо применять численные методы интегрирования. Таким образом, измерение относительной интенсивности нормально отраженной волны в фокальной плоскости объектива позволяет определить шероховатость диффузно отраженной поверхности. В случае нелинейной регистрации голографических дифракционных решеток гармоничный профиль может быть существенно деформирован и приближается к треугольному. Поэтому для исследования отражательных голографических дифракционных решеток и определения их дифракционной эффективности используют модель с треугольным профилем штриха.

Ключевые слова: отражающая дифракционная решетка; треугольный профиль; дифракционная эффективность; шероховатость

N. DOMINA, M. MOROZOV, V. SOLODOV, L. KHALANCHUK

REFLECTION OF LIGHT FROM THE DIFFRACTION GRATING WITH TRIANGULAR PROFILE

We study the light diffraction at a reflective grating with triangular profile in scalar wave optics approximation. The case of 1D diffusively reflective rough surface can be described in the first approximation as a random set of reflective gratings with triangular profiles, which are characterised by normal (Gaussian) distribution of amplitude and spatial period. We have obtained the condition for amplitude and period of a diffraction grating in the case of absence of secondary reflections, and the dependence of optical path difference on amplitude and spatial period of the triangular profile. We have investigated the influence of triangular profile parameters on the intensity of reflected wave. We have measured the relative intensity (reflection coefficients) of rough surface reference samples in the case of normal incidence. The relative intensity of reflected wave in the case of normal incidence is used in the design of optical contactless methods for the characterisation of rough surfaces in range of 0.05...0.25 μm . We suggested an optical scheme for the surface roughness measurements, and tested it on the reference samples of rough surfaces. We investigated the dependence of reflected wave intensity on the diffraction angle, and simulated it using numerical solutions of Maxwell equation (FDTD methods). Therefore, we demonstrate that measurements of relative intensity of the reflected wave in the normal to sample plane direction in an objective focal plane allow for determination of the roughness of diffusively reflective surfaces.

Key words: reflective diffraction grating; triangular profile; diffraction efficiency; roughness

Вступ. Дифракційні структури знаходять широке практичне застосування. Їх використовують у захисних голографічних технологіях, в оптоелектроніці для поліпшення ефективності введення випромінювання, в спектроскопії, в мікро-оптоелектронних системах, а також у метрології. Дослідження відбиття світла від шорсткої поверхні дає можливість розробити оптичні дистанційні методи вимірювання параметрів шорсткості, які широко використовуються для метрологічного забезпечення виробництва у багатьох галузях прецизійного машинобудування. У випадку дифузно

відбиваючої шорсткої поверхні її рельєф у першому наближенні можна уявити як набір відбивних трикутних ґраток з нормальним законом розподілу амплітуди та просторового періоду, тому вивчення параметрів відбитого світла в цьому випадку є актуальним, що дає можливість розробити безконтактні оптичні методи вимірювання шорсткості поверхні.

© Н.А.Дьоміна, М.В.Морозов,
В.В.Солодов, Л.В.Халанчук, 2020

Аналіз останніх досліджень. Оптика шорсткої поверхні, дифузне відбиття та залежність інтенсивності відбитого світла від параметрів шорсткої поверхні досліджується у статтях [1, 2]. У роботах [3, 4] представлено огляд сучасних оптичних методів вимірювання шорсткості поверхні та їх застосування в техніці. вплив показника заломлення навколишнього середовища та модуляції (глибини) рельєфу на дифракційну ефективність відбивної та пропускнуої рельєфно-фазових дифракційних ґраток із прямокутним профілем досліджено у роботах [5, 6]. Результати досліджень різноманітних відбивних ґраток, їх дифракційної ефективності та застосування у оптичних приладах наведено у статтях [7–13]. У роботах [14, 15] розглянуто відбиття світла від гармонічних дифракційних ґраток. Для центрального нульового дифракційного максимуму (інтенсивність дзеркальної складової відбитої хвилі) залежність інтенсивності відбитої хвилі від амплітуди профілю одновимірної синусоїдальної ґратки має вигляд:

$$I_1 = J_0^2 \left(\frac{2\pi Z_m}{\lambda} \right), \quad (1)$$

де J_0 – функція Бесселя 0-го порядку;
 λ – довжина хвилі випромінювання;

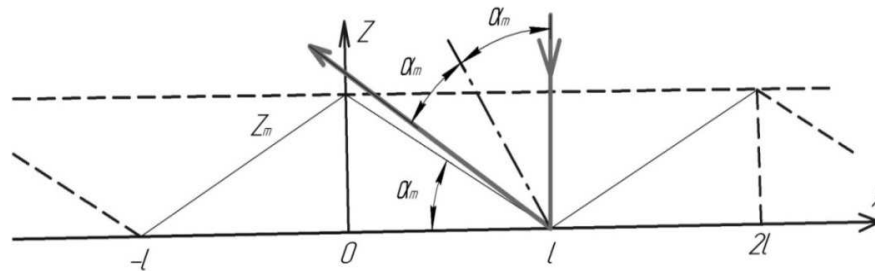


Рисунок 1 – Відбивна дифракційна ґратка з трикутним профілем

Значення параметрів (Z_m , l) відбивних дифракційних ґраток для шорсткої поверхні мають випадковий характер з нормальною гауссовою щільністю розподілу. Розглянемо умови, за яких відсутнє подвійне відбиття від ґратки з трикутним профілем. При нормальному падінні відсутність повторного відбиття буде, якщо кут α_m профілю дифракційної ґратки відповідає умові (див. рис. 1):

$$\alpha_m \leq 30^\circ \text{ та } \operatorname{tg} \alpha_m = \frac{Z_m}{l} \leq 0,577.$$

Розглянемо інтенсивність відбитої хвилі при нормальному падінні. Оптична різниця ходу у випадку нормального падіння та відбиття дорівнює:

$$\Delta(x) = 2x \cdot \operatorname{tg} \alpha_m = 2x \frac{Z_m}{l} \text{ при } 0 \leq x \leq l. \quad (3)$$

Для випадку скалярного наближення амплітуда E плоскої відбитої хвилі при нормальному відбитті без урахування повторного відбиття дорівнює [14]:

$$E = \frac{E_0}{l} \int_0^l e^{i(\omega t - k\Delta)} dx, \quad (4)$$

Z_m – амплітуда синусоїдального рельєфу ґратки.

Постановка проблеми. Характеристики відбитого від шорсткої поверхні світла використовують для визначення параметрів шорсткості. Тому актуальні дослідження відбиття світла від такої поверхні та залежності інтенсивності нормальної складової від параметрів шорсткості.

Мета роботи – дослідити відбиття монохроматичного світла, в першу чергу, інтенсивності дзеркальної складової від дифракційної ґратки з трикутним профілем, а також створити спосіб експрес-вимірювання шорсткості дифузно відбиваючої поверхні.

Основні матеріали дослідження. Шорстку дифузно відбиваючу поверхню у першому наближенні можливо подати як випадковий набір відбиваючих дифракційних ґраток з трикутним профілем (рис.1), який задається у вигляді:

$$z(x) = \begin{cases} Z_m \left(1 - \frac{x}{l} \right) & \text{при } 0 \leq x \leq l, \\ Z_m \left(\frac{x}{l} - 1 \right) & \text{при } l \leq x \leq 2l, \end{cases} \quad (2)$$

де Z_m – амплітуда;

$2l$ – період дифракційної ґратки.

де $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число;

λ – довжина хвилі випромінювання.

Тоді амплітуда відбитої хвилі дорівнює:

$$\begin{aligned} E(Z_m) &= \frac{E_0}{l} \int_0^l e^{i(\omega t - k\Delta)} dx = \\ &= \frac{E_0 e^{i\omega t}}{2k \cdot Z_m} \{ \sin(2k \cdot Z_m) + i[\cos(2k \cdot Z_m) - 1] \}. \end{aligned} \quad (5)$$

Відносна інтенсивність відбитої хвилі дорівнює у цьому випадку ($\varphi = 0$):

$$I(Z_m) = \langle EE^* \rangle = \left(\frac{\sin kZ_m}{kZ_m} \right)^2. \quad (6)$$

На рис. 2 представлено графік залежності відносної інтенсивності нормальної складової відбитої хвилі від амплітуди модуляції ґратки Z_m .

Залежність інтенсивності відбитої хвилі від шорсткої поверхні може бути використана для вимірювання параметрів шорсткості поверхні. У першому наближенні середня арифметична висота

R_a виступів дорівнює математичному сподіванню Z_m . Тому, якщо виміряти відносну інтенсивність нормальної складової відбитого світла, можливо

визначити шорсткість поверхні.

На рис. 3 представлена оптична схема для вимірювання параметрів шорсткості поверхні.

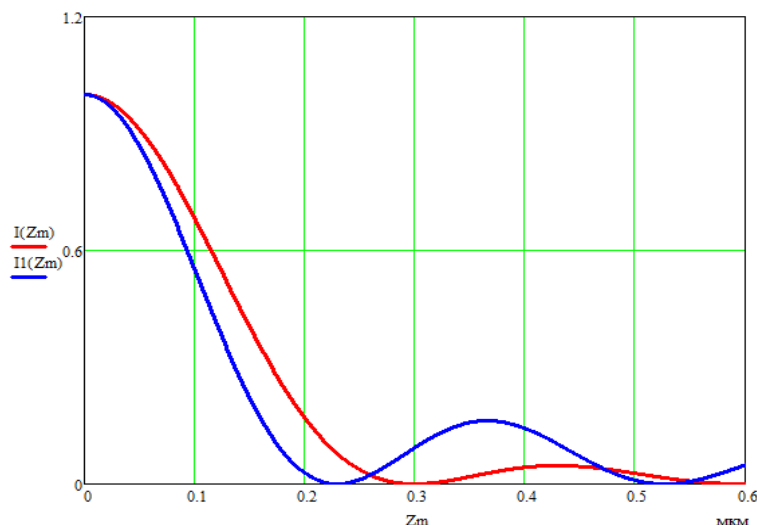
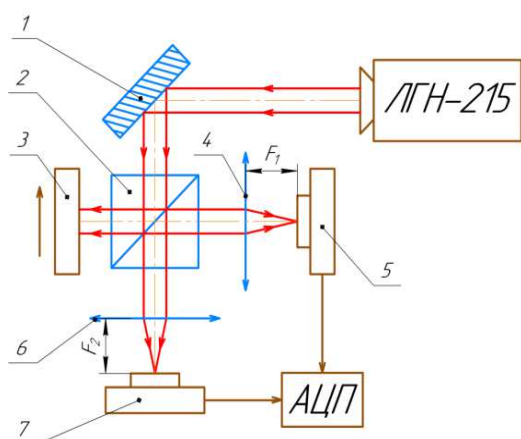


Рисунок 2 – Графіки залежності інтенсивності нормальної складової відбитої хвилі від амплітуди профіля трикутної (I) та гармонічної (I_1) ґраток



1 – дзеркало; 2 – світлоподільник; 3 – зразок з дифузно відбиваючою поверхнею; 4 – об'єктив; 5 – фотоприймач; 6 – об'єктив з фокусною відстанню F_2 ; 7 – фотоприймач ФЕУ-85

Рисунок 3 – Оптична схема вимірювання шорсткості поверхні

За допомогою дзеркала 1 та світлоподільника 2 формують світлову хвилю для освітлення досліджуваної дифузно відбиваючої шорсткої поверхні зразка 3. Нормально відбиту хвилю за допомогою об'єктива 4 фокусують у фокальній площині та вимірюють фотоприймачем 5 інтенсивність цієї відбитої хвилі. Вимірюють також інтенсивність падаючої хвилі (фотоприймач ФЕУ-85 7) та визначають відносну інтенсивність нормально відбитої хвилі від шорсткої поверхні шляхом порівняння з табличними значеннями (табл. 1)

Отримання у фокальній площині об'єктива 4 відбитої від шорсткої поверхні хвилі є оптичним аналогом перетворення Фур'є, яке може бути

використане для визначення параметрів шорсткості.

Таблиця 1

Класи шорсткості	9	10	11	12	13	14
$R_a(Z_m)$, мкм	0,32	0,16	0,08	0,04	0,02	0,01
$I_{теор.}$	0,01	0,396	0,807	0,949	0,987	0,997

Розглянемо залежність інтенсивності відбитої хвилі при нормальному освітненні від кута дифракції $I(\varphi)$. Оптична різниця ходу у цьому випадку дорівнює (рис. 4):

$$\begin{cases} \Delta_1 = \Delta_{1,1} + \Delta_{1,2} = x \cdot \operatorname{tg} \alpha + \\ + x(\sin \varphi + \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \varphi) \text{ при } 0 \leq x \leq l \\ \Delta_2 = \Delta_{2,1} + \Delta_{2,2} = (2l - x) \operatorname{tg} \alpha (1 + \cos \varphi) + \\ + x \cdot \sin \varphi \text{ при } l < x \leq 2l. \end{cases} \quad (7)$$

Тоді амплітуда відбитої хвилі під кутом φ дорівнює

$$E(\varphi) = \frac{E_0 e^{i\omega t}}{2l} \left(\int_0^l e^{-ik\Delta_1} dx + \int_0^{2l} e^{-ik\Delta_2} dx \right). \quad (8)$$

Для обчислення інтегралу (8) та інтенсивності $I(\varphi) = \langle EE^* \rangle$ відбитої хвилі використовують чисельні методи.

У подальшому можливо дослідження дифракції у ближній зоні (дифракція Френеля) за допомогою метода скінченних різниць у часовому просторі (FDTD) для розв'язання рівнянь Максвелла електромагнітного поля.

При голографічній технології виготовлення відбивних ґраток (рис. 5) профіль буде гармонічним [14, 15]:

$$z(x) = \frac{z_{max}}{2} (1 + \cos k_1 x), \quad (9)$$

де $k_1 = 2\pi/d$ – хвильовий вектор ґратки,
 $d = \lambda/(2\sin 2\varphi)$ – просторовий період голографічної ґратки,

λ – довжина хвилі когерентного випромінювання, яке використовують при реєстрації ґратки,
 2φ – кут між двома когерентними пучками, які використовують при реєстрації ґратки.

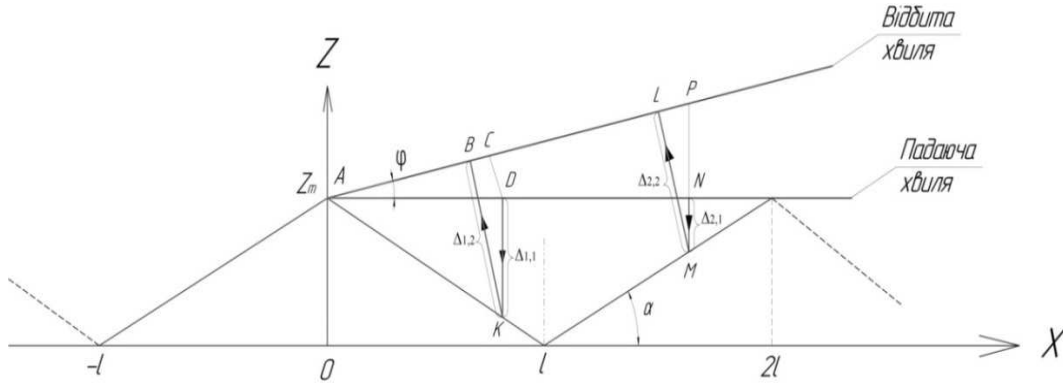


Рисунок 4 – Залежність оптичної різниці ходу Δ від кута φ відбиття

Тоді оптична різниця ходу при нормальному освітленні та відбитті дорівнює:

$$\Delta_1(z_m, x) = 2z_{max} (1 + \cos k_1 x). \quad (10)$$

Амплітуда відбитої хвилі у нормальному напрямку для одного періоду дифракційної ґратки має вигляд:

$$E(z_{max}) = \frac{E_0}{d} \int_0^d e^{i(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \Delta_1)} dx = E_0 e^{i\omega t} \cdot e^{-i\frac{2\pi}{\lambda} z_{max}} \cdot J_0[(2\pi/\lambda) z_{max}], \quad (11)$$

де $J_0(\frac{2\pi}{\lambda} z_{max})$ – функція Бесселя нульового порядку.

Інтенсивність пропорційна квадрату амплітуди та дорівнює після осереднення за часом (див. рис. 2):

$$I_1(z_m) = J_0^2(\frac{2\pi}{\lambda} z_m). \quad (12)$$

Будь-який профіль шорсткої поверхні можна подати у вигляді ряду Фур'є, періоди якого визначаються неоднорідностями профілю поверхні. Значення періодів гармонік ряду Фур'є знаходяться в інтервалі від нанометру до 10 міліметрів. У цьому випадку забезпечується комплексне подання якості поверхні, яке описується спектральною щільністю потужності $PSD(v_x, v_y)$ відхилення її профілю [4]. Використання функції $PSD(v_x, v_y)$ пов'язане з поданням профілю поверхні не в координатній, а у частотній області спектру розподілу амплітуд відхилення профілю за різними частотами (v_x, v_y) .

Якщо застосовують нелінійний випадок реєстрації замість гармонічного профілю отримують трикутний профіль ґратки (рис. 5). Ця модель досліджується у даній роботі. Нелінійна реєстрація голографічної ґратки відбувається при достатньо великих енергіях лазерних променів. При цьому

спостерігається випалення реєструючого середовища.

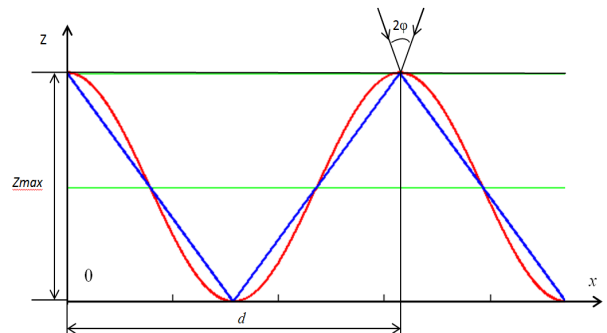


Рисунок 5 – Реєстрація голографічної відбивної дифракційної ґратки з трикутним та гармонічним профілями

Висновок. Для відбивної дифракційної ґратки з трикутним профілем розглянуто залежність інтенсивності світла від амплітуди рельєфу ґратки при нормальному освітленні та при відбитті світла від неї. Розроблено експрес-метод визначення шорсткості дифузно відбивної поверхні з використанням зразка з відомими параметрами шорсткості.

Результати дослідження можна використовувати також для визначення дифракційної ефективності голографічних відбивних ґраток з трикутним профілем, які отримують у випадку нелінійної реєстрації.

Список літератури

1. Олейник В.И., Шмаров В.Н. Некоторые вопросы отражения лазерного излучения от шероховатых металлических поверхностей. *Системы обработки информации*. 2005. № 3(43). С. 152–160.
2. Макеев А.В. Об оптических методах контроля шероховатости поверхности. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2016. С. 147–151.
3. Назаров Ю.Ф., А.М. Шкилько, В.В. Тихоненко, Компанец И.В. Методы исследования и контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов. *ФГПФИП PSE*. 2007, т. 5. № 3–4. С. 207–216.

4. Барышников Н.В., Гладышева Я.В., Денисов Д.Г., ..., Судариков И.Н. Исследование интерференционных методов контроля формы и качества высокоточных поверхностей крупногабаритных оптических деталей. *Вестник МГТУ им. Баумана. Серия: Приборостроение*. Москва, 2012. С. 4–16.
5. Настас А.М., Иову М.С. Исследование влияния показателя преломления окружающей среды на дифракционную эффективность отражающей и рельефно-фазовой дифракционных решеток. *Журнал технической физики*. 2015. Том 85, вып. 3. С. 146–147.
6. Настас А.М., Иову М.С. Исследование влияния глубины рельефа на дифракционную эффективность отражающей и пропускающей рельефно-фазовых дифракционных решеток. *Журнал технической физики*. 2015. Том 85, вып. 7. С. 133–134.
7. Харитонов С.И., Казанский Н.Л., Досколович Л.Л., Стрелков Ю.С. Моделирование отражения электромагнитных волн от дифракционных решеток. *Компьютерная оптика*. 2016. Т. 40, Вып. 2. С. 194–202.
8. Васильева В.В., Винокуров Д.А., Золотарев В.В., ..., Тарасов И.С. Дифракционные решетки с отражением в высоком порядке для мощных полупроводниковых лазеров. *Физика и техника полупроводников*. 2012. Том 46, вып. 2. С. 252–257.
9. Braig C., Fritsch L., Käsebier T., ..., Tünnermann A. An EUV beamsplitter based on conical grazing incidence diffraction. *Optics Express*. 2012. Vol. 20, iss. 2, pp. 1825–1838.
10. BogU., Huska K., Maerke F., ..., Mappes T. Design of plasmonic grating structures towards optimum signal discrimination for biosensing applications. *Optics Express*. 2012. 20(10). P. 11357–11369.
11. Iqbal, T., Khalil, S., Ijaz, M. et al. Optimization of 1D Plasmonic Grating of Nanostructured Devices for the Investigation of Plasmonic Bandgap. *Plasmonics*. 2019. Vol. 14, pp. 775–783.
12. Михайловська К.В., Минько В.І., Індутний І.З., Шепелявий П.С. Вплив періодичного рельєфу кремнієвої підкладки на поляризацію фотолумінесценції nc-Si–SiO_x наноструктур. *Оптоелектроніка і напівпровідникові техніки*, 2017, вип. 52. С. 100–107.
13. Xufeng Jinga, Chee Leong Tana, Chan Il Yeoa, Sung Jun Janga, Yong Tak Lee Transmittance design of internal reflection triangular-groove grating at large dimension domain. *Optics and Lasers in Engineering*. 2013. Vol. 51, Iss. 4, pp. 402–409.
14. Дьоміна Н.А., Морозов М.В. Відбиваючі дифракційні ґратки з гармонічним рельєфом. *Праці ТДАТУ*. Мелітополь, 2015. Том 4. Вип. 15. С. 111–114.
15. Дьоміна Н.А., Морозов М.В. Дифракція світла при відбитті від гармонічної ґратки. *Праці ТДАТУ*. Мелітополь, 2017. Том 2. Вип. 17. С. 127–131.
16. *obrobki informatsiyi*. 2005, no. 3(43), pp. 152–160.
17. Makeev A.V. Ob opticheskikh metodah kontrolya sherohovatosti poverhnosti. *Interksp Geo-Sibir*. 2016, pp. 147–151.
18. Nazarov Yu.F., A.M. Shkilko, V.V. Tihonenko, Kompaneets I.V. Metody issledovaniya i kontrolya sherohovatosti poverhnosti metallov i splavov. *FGFIP PSE*. 2007. Tom 5, no. 3–4, pp. 207–216.
19. Baryshnikov N.V., Gladysheva Ya.V., Denisov D.G., ..., Sudarikov I.N. Issledovanie interferentsionnykh metodov kontrolya formy i kachestva vyisokotochnykh poverhnostey krupnogabaritnykh opticheskikh detaley. *Vestnik MGTU im. Baumana. Seriya: Priborostroenie*. Moskva, 2012. pp. 4–16.
20. Nastas A.M., Iovu M.S. Issledovanie vliyaniya pokazatelya prelomleniya okruzhayushey sredy na difraktsionnyy effektivnost otrazhayushey i relefno-fazovoy difraktsionnykh reshetok. *Zhurnal tehnicheksy fiziki*. 2015. Tom 85, vol. 3, pp. 146–147.
21. Nastas A.M., Iovu M.S. Issledovanie vliyaniya glubiny relefa na difraktsionnyy effektivnost otrazhayushey i propuskayushey relefno-fazovykh difraktsionnykh reshetok. *Zhurnal tehnicheksy fiziki*. 2015. Tom 85, vol. 7, pp. 133–134.
22. Haritonov S.I., Kazanskiy N.L., Doskolovich L.L., Strelkov Yu.S. Modelirovanie otrazheniya elektromagnitnykh voln ot difraktsionnykh reshyotok. *Kompyuternaya optika*. 2016. Tom 40, vol. 2, pp. 194–202.
23. Vasileva V.V., Vinokurov D.A., Zolotarev V.V., ..., Tarasov I.S. Difraktsionnye reshetki s otrazheniem v vyisokom porjadke dlya moschnyihpoluprovodnikovyykh lazerov. *Fizika i tehnika poluprovodnikov*. 2012. Tom 46, vol. 2, pp. 252–257.
24. Braig C., Fritsch L., Käsebier T., ..., Tünnermann A. An EUV beamsplitter based on conical grazing incidence diffraction. *Optics Express*. 2012, vol. 20, iss. 2, pp. 1825–1838.
25. BogU., Huska K., Maerke F., ..., Mappes T. Design of plasmonic grating structures towards optimum signal discrimination for biosensing applications. *Optics Express*. 2012, no. 20(10), pp. 11357–11369.
26. Iqbal, T., Khalil, S., Ijaz, M. et al. Optimization of 1D Plasmonic Grating of Nanostructured Devices for the Investigation of Plasmonic Bandgap. *Plasmonics*. 2019, vol. 14, pp. 775–783.
27. Mihaylovska K.V., Minko V.I., Indutniy I.Z., Shepelyaviy P.E. Vpliv periodichnogo relefu kremnievoyi pidkladki na polarizatsiyu fotoluminentsentsiyi nc-Si–SiO_x nanostruktur. *Optoelektronika i poluprovodnikovaya tehnika*, 2017, vol. 52, pp. 100–107.
28. Xufeng Jinga, Chee Leong Tana, Chan Il Yeoa, Sung Jun Janga, Yong Tak Lee Transmittance design of internal reflection triangular-groove grating at large dimension domain. *Optics and Lasers in Engineering*. 2013, vol. 51, iss. 4, pp. 402–409.
29. Domlna N.A., Morozov M.V. Vidbivayuchi difraktsionni gratki z harmonichnim rel'efom. Pratsi TDATU. Melitopol, 2015. Tom 4, vol. 15, pp. 111–114.
30. Domlna N.A., Morozov M.V. Difraktsiya svitla pri vldbitti vld harmonichnoyi Gratki. Pratsi TDATU. Melitopol, 2017. Tom 2, vol. 17, pp. 127–131.

References (transliterated)

1. Oleynik V.I., Shmarov V.N. Nekotorye voprosy otrazheniya lazernogo izlucheniya ot sherohovatykh metallicheskih poverhnostey. *Sistemi*

Надійшла (received) 21.04.2020

Відомості про авторів /Сведения об авторах /About the Authors

Дьоміна Наталія Анатоліївна (Деміна Наталія Анатоліївна, Domina Natalia) – кандидат технічних наук, доцент, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, доцент кафедри «Вища математика і фізика», м. Мелітополь, Запорізька обл., Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1118-1834>; e-mail: natalia.domina@tsatu.edu.ua.

Морозов Микола Вікторович (Морозов Николай Вікторович, Morozov Mykola) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, доцент кафедри «Вища математика і фізика», м. Мелітополь, Запорізька обл., Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5122-8449>; e-mail: mykola.morozov@tsatu.edu.ua.

Солодов Вадим Вікторович (Солодов Вадим Вікторович, Solodov Vadym) – Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, інженер 1 категорії кафедри «Комп'ютерні науки», м. Мелітополь, Запорізька обл., Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6697-2772>; e-mail: kn@tsatu.edu.ua.

Халанчук Лариса Вікторівна (Халанчук Лариса Вікторівна, Khalanchuk Larisa) – Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, асистент кафедри «Вища математика і фізика», м. Мелітополь, Запорізька обл., Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6055-6233>; e-mail: larisa.khalanchuk@tsatu.edu.ua.