

ФІЗИКА, ТЕХНОЛОГІЯ ТА ВИРОБНИЦТВО ЕЛЕМЕНТІВ, ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

УДК 681.785.55

Л.В. Бартків

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра фотоніки

РОЗРАХУНОК І ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ВГНУТОЇ ГОЛОГРАФІЧНОЇ ГРАТКИ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО МУЛЬТИ/ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРА

© Бартків Л.В., 2010

L.V. Bartkiv

CALCULATION AND OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF CONCAVE HOLOGRAPHIC GRATING FOR WDM MULTI/DEMULTIPLEXER

© Bartkiv L.V., 2010

Наведено результати розрахунків і оптимізації параметрів вгнутої голографічної ґратки для використання у мульти/демультиплексорі для ущільнення і розділення каналів передавання по довжинах хвиль у системах передавання даних з полімерними оптичними волокнами.

Ключові слова: полімерне оптичне волокно, вгнута голографічна ґратка, ущільнення і розділення по довжинах хвиль.

In this paper the results of calculations and optimization of parameters of concave holographic grating for the use in multi/demultiplexer for the wavelength multiplexing and demultiplexing of transmission channels in data transmission systems with polymer optical fibers are presented.

Keywords: polymer optical fiber, concave holographic grating, wavelength-division-multiplexing.

Вступ

Одномодові кварцеві оптичні волокна (КОВ) широко використовують у системах високошвидкісного передавання даних (Гбіт/с) на довгі дистанції, оскільки мають широку смугу пропускання і малий коефіцієнт загасання оптичного випромінювання. Використання таких волокон на коротких дистанціях передавання є неефективним через їх дуже малий діаметр і, як наслідок, високі вимоги до точності з'єднань. Тому у системах передавання даних на короткі віддалі переважно використовують багатомодові КОВ та полімерні оптичні волокна (ПОВ) [1, 2]. Останні мають істотні переваги над кварцевими волокнами під час застосування на невеликих відстанях до декількох сотень метрів. Серед різних типів полімерних волокон найпоширенішими сьогодні є ПОВ на основі поліметилметакрилату (ПММА), які мають прямокутний профіль

показника заломлення. Їх ще називають стандартними полімерними оптичними волокнами. Одним із недоліків таких ПОВ є їхня вузька смуга пропускання. Для підвищення пропускну здатності ліній передавання із стандартним ПОВ використовують різноманітні методи, серед яких найефективнішим є метод ущільнення і розділення каналів передавання по довжинах хвиль. Цей метод дає змогу збільшити сумарну пропускну здатність лінії передавання за рахунок одночасного передавання багатьох незалежних інформаційних сигналів по одному волокну, використовуючи оптичні несучі на різних довжинах хвиль [3]. Для просторового об'єднання/розділення оптичних несучих використовують спеціальні пристрої – мульти/демультиплексори [4]. Спеціально для систем передавання даних з ПОВ були розроблені і виготовлені різні типи таких мульти/демультиплексорів з використанням інтерференційних фільтрів та плоских дифракційних ґраток [1]. Одним із недоліків таких пристроїв є необхідність використання додаткової колімуючої і фокусуєчої оптики, що ускладнює юстування елементів пристрою і робить його громіздким. У системах з одномодовими КОВ цей недолік виправлений з використанням вгнутої дифракційної ґратки [5]. Вгнута ґратка має дифракційні та фокусуєчі властивості, а тому може одночасно розділяти і фокусувати світло різних довжин хвиль без допомоги додаткових оптичних елементів. Мульти/демультиплексор на вгнутій ґратці складається тільки з однієї вгнутої ґратки (див. рис. 1). Оскільки такі пристрої ще не були практично реалізовані для систем передавання даних з полімерними волокнами, основною метою роботи є проектування вгнутої дифракційної ґратки для спектрального мульти/демультиплексора, який використовуватиметься в системах передавання даних з полімерними оптичними волокнами.

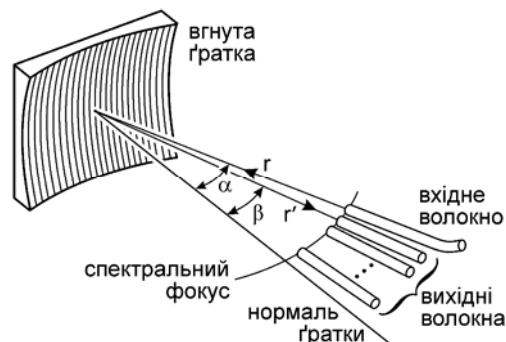


Рис. 1. Оптична схема спектрального мульти/демультиплексора з вгнутою дифракційною ґраткою

Розрахунок основних параметрів вгнутої дифракційної ґратки

Розрахунок параметрів вгнутої дифракційної ґратки розпочинається із визначення вимог, які висувають до майбутнього мульти/демультиплексора. До таких вимог насамперед зараховують кількість каналів та міжканальне розділення. Для нашого випадку мульти/демультиплексор повинен об'єднувати/розділювати як мінімум чотири спектральних канали. Проте, в майбутньому може виникнути необхідність у передаванні по одному волокну більшої кількості каналів. Тому можливість збільшення кількості каналів має бути врахована на етапі проектування вгнутої дифракційної ґратки для спектрального мульти/демультиплексора.

Стандартне полімерне оптичне волокно на основі ПММА використовують як правило у видимій області спектра в діапазоні від 400 нм до 700 нм, де воно має мінімуми загасання на довжинах хвиль 520 нм, 570 нм і 650 нм [1, 2]. Джерелами оптичного випромінювання з волокнами такого типу найчастіше використовують світловипромінювальні діоди. Наявні сьогодні на ринку світлодіоди майже повністю перебивають весь видимий діапазон, ширина спектра випромінювання яких коливається в межах від 15 нм до 50 нм. Враховуючи це, розділення спектральних

каналів мульти/демультиплексора приймали 30 нм. За такого міжканального розділення максимальна кількість каналів мульти/демультиплексора може становити 8–10.

Для розрахунку основних параметрів вгнутої ґратки та конструктивних параметрів мульти/демультиплексора як правило користуються добре відомою схемою з класичною вгнутою ґраткою, в якій оптичні волокна розміщуються на крузі Роуланда (див. рис. 2) [6]. Віддаль між сусідніми вихідними волокнами може бути різною, причому, чим більшою вона буде, тим кращою буде зв'язка між каналами. Однак, її збільшення є небажаним з погляду компактності мульти/демультиплексора. Незважаючи на це, на початковій стадії розрахунків розглядають як правило граничний випадок, коли вихідні оптичні волокна розміщуються впритул одне до одного. Якщо діаметр стандартного ПОВ становить 1 мм, а мінімальне спектральне розділення каналів дорівнює 30 нм, то в такому разі можна визначити мінімальну лінійну дисперсію в площині розміщення вихідних волокон, яка дорівнює приблизно $3,4 \times 10^4$. Щоб мати деякий ступінь вільності в розміщенні волокон та покращити міжканальне розділення, значення лінійної дисперсії як правило приймають трохи більшим, ніж розраховане. Для нашого випадку було прийнято лінійну дисперсію, що дорівнює 4×10^4 . Враховуючи це значення, радіус R вгнутої поверхні ґратки та період штрихів Λ в її центрі пов'язані між собою співвідношенням: $R/\Lambda \geq 4 \times 10^4$. Отже, знаючи радіус вгнутої поверхні ґратки, можна легко визначити період ґратки, і навпаки. З практичних міркувань радіус і період ґратки були вибрані 50 мм і 1250 нм, відповідно. Оскільки пристрій має бути компактним, волокна повинні бути розташовані якомога ближче одне до одного. Якщо вихідні волокна розташовані одне від одного на деякій віддалі Δx , яка вважається незмінною при сталому періоді ґратки, то положення вхідного волокна відносно вихідних Δx можна легко змінювати, змінюючи кут орієнтації вхідного волокна відносно нормалі до центра ґратки. Отже, беручи до уваги отримані параметри ґратки, оптимальний кут розміщення вхідного волокна становить $17,5^\circ$.

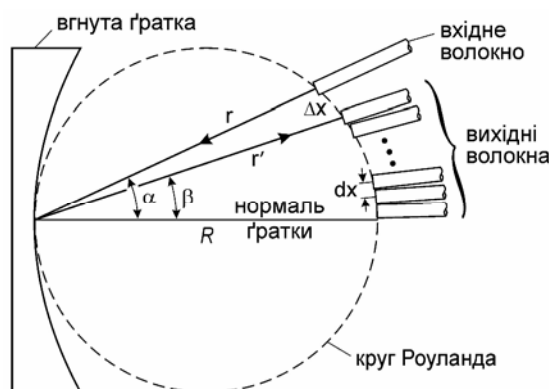


Рис. 2. Схема розміщення оптичних волокон на крузі Роуланда

Діаметр вгнутої дифракційної ґратки в загальному випадку залежить від типу вхідного оптичного волокна та від його розташування по відношенню до ґратки. Враховуючи те, що ПОВ з діаметром 1 мм має числову апертуру порядку 0,3–0,5 (0,3 для ПОВ з пониженою числовою апертурою), з практичних міркувань було вибрано діаметр ґратки 30 мм.

Оптимізація параметрів вгнутої дифракційної ґратки для спектрального мульти/демультиплексора

Після отримання основних параметрів вгнутої ґратки з метою покращання спектральних характеристик пропускання мульти/демультиплексора як правило проводять оптимізацію параметрів ґратки. Для покращання міжканального розділення необхідно провести мінімізацію аберацій вгну-

тої ґратки, а для зменшення вносимих втрат у спектральних каналах – оптимізацію її дифракційної ефективності.

Для мульти/демультиплектора було вибрано голографічну вгнуто ґратку, оскільки вона має кращі абераційні характеристики порівняно з нарізною вгнутою ґраткою [7]. Мінімізація аберацій вгнутої ґратки як правило проводиться шляхом вибору оптимальної поверхні для вгнутої ґратки та оптимальної форми штрихів ґратки [8]. Дивлячись на вартість мульти/демультиплектора, було вибрано сферичну поверхню для вгнутої ґратки, оскільки її простіше виготовити. У такому разі залишається тільки оптимізувати форму штрихів ґратки. Для голографічної вгнутої ґратки оптимізація форми її штрихів здійснюється шляхом вибору оптимального розміщення точкових записувальних джерел (див. рис. 3). Для цього користуються абераційною функцією дифракційної ґратки [9]. Абераційна функція є корисною у тому сенсі, що вона дозволяє оцінити розмір плями точкового джерела у площині зображення вгнутої ґратки [10]. Перебираючи варіанти розміщення записувальних джерел, можемо знайти таке їх розташування, за якого у площині зображення вгнутої ґратки аберації будуть мінімальними. З цією метою у середовищі Delphi було реалізовано алгоритм мінімізації аберацій у площині зображення вгнутої ґратки. У результаті отримано оптимальні параметри вгнутої голографічної ґратки для спектрального мульти/демультиплектора, які наведені в таблиці.

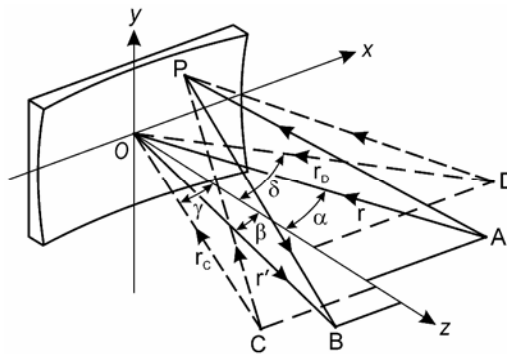


Рис. 3. Схема розміщення точкових когерентних джерел C і D для запису голографічної вгнутої ґратки (A і B – точкове джерело світла і його зображення)

Параметри оптимізованої вгнутої голографічної ґратки

г, мм	α , град.	r_D , мм	δ , град.	r_C , мм	γ , град.	λ_0 , нм	σ_0 , нм	R, мм	D, мм
47,7	17,5	47	22,4	50,3	-7,2	632,8	1250	50	30

На рис. 4 показано положення меридіональної і сагітальної фокальних кривих для оптичної системи з вгнутою голографічною ґраткою, параметри якої наведені у таблиці. На рис. 4 видно, що меридіональна фокальна крива для робочого діапазону довжин хвиль 400–700 нм розміщується на крузі Роуланда. Сагітальна фокальна крива перетинає меридіональну фокальну криву у двох точках на довжинах хвиль близько 450 нм і 650 нм, в яких аберації є повністю мінімізовані. Вхідне та вихідні оптичні волокна мульти/демультиплектора з такою оптичною системою розміщуються на крузі Роуланда.

Після отримання параметрів вгнутої голографічної ґратки за допомогою розробленої у середовищі Delphi комп'ютерної програми було проведено моделювання зображень торця вхідного волокна у площині зображення розрахованої вгнутої ґратки для окремих довжин хвиль видимого діапазону спектра, які показані на рис. 5.

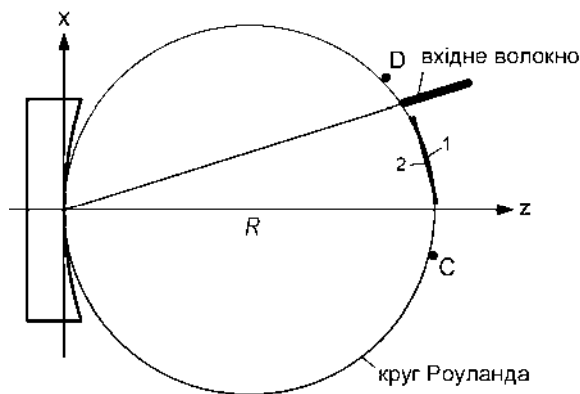


Рис. 4. Положення меридіональної (1) і сагітальної (2) фокальних кривих для оптичної системи з оптимізованою вгнутою голографічною ґраткою (точки C і D вказують на розміщення точкових когерентних джерел для запису ґратки)

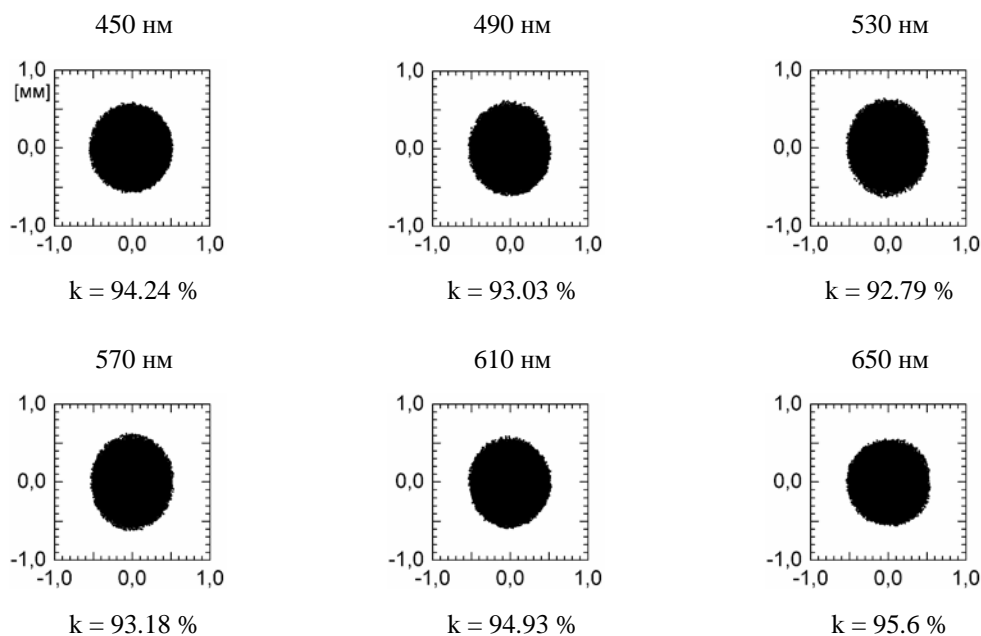


Рис. 5. Зображення торця вхідного волокна ($\Delta = 1$ мм) у площині зображення розрахованої вгнутої ґратки для різних довжин хвиль: k – коефіцієнт зв'язку

Як видно на рис. 5, для довжин хвиль 450 нм і 650 нм, для яких меридіональний і сагітальний фокуси оптичної системи з розрахованою вгнутою ґраткою збігаються, аберації мінімізовані. Для інших довжин хвиль проявляються незначні аберації у вертикальному напрямку. У будь-якому випадку, коефіцієнт зв'язку k , що вказує на те, яка частина світлових променів дифрагованих вгнутою ґраткою у робочий дифракційний порядок потрапляє у вихідне волокно, приймає доволі високе значення більше 90%, а його варіації не перевищують 3% для робочих довжин хвиль.

У системах передавання даних з ущільненням і розділенням каналів по довжинах хвиль важливою характеристикою є рівень перехідних міжканальних завад. Для теоретичної оцінки міжканальної розв'язки було створено у середовищі Delphi комп'ютерну програму, яка дозволяє розрахувати коефіцієнт вводу хвиль, які дифрагуються вгнутою ґраткою у робочий дифракційний порядок, у вихідне волокно для заданого діапазону довжин хвиль, які надходять по вхідному волокну. Результати такого моделювання для шести спектральних каналів наведені на рис. 6. На

цьому рисунку можна побачити, що сусідні спектральні канали перекриваються на рівні 10 %, що свідчить про те, що вони є непогано розв'язані (на практиці перехідні міжканальні завади будуть нижчі, оскільки джерела світла як правило мають спектр випромінювання з гауссівським розподілом).

Наступним етапом у роботі була оптимізація дифракційної ефективності вгнутої голографічної ґратки. При голографічному записі вгнутої ґратки інтерференційна картина сформована на сферичній підкладці від двох когерентних точкових джерел світла переноситься на поверхню підкладки у вигляді модуляції її рельєфу. Оскільки модуляція інтенсивності на поверхні підкладки має синусоїдальний характер, то штрихи ґратки матимуть подібний профіль. Період штрихів ґратки у такому випадку дорівнює періоду інтерференційних смуг, а дифракційна ефективність визначається глибиною модуляції рельєфу її поверхні. Отже, щоб покращити дифракційну ефективність синусоїдальної голографічної ґратки, необхідно оптимізувати глибину модуляції її поверхневого рельєфу. За допомогою програми GSolver 4.20 було отримано оптимальну глибину синусоїдального профілю штрихів у центрі вгнутої голографічної ґратки, яка становить 150 нм. Після цього було порашовано спектральну криву дифракційної ефективності для робочого дифракційного порядку, яка показана на рис. 7.

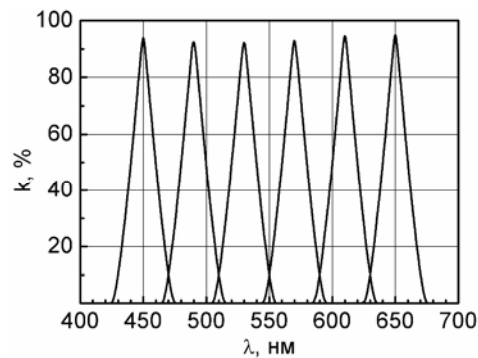


Рис. 6. Ефективність вводу світлових променів, які дифраговані вгнутою ґраткою у робочий дифракційний порядок, у відповідне вихідне волокно для різних довжин хвиль

Як видно з рис. 7, дифракційна ефективність для оптимізованої відбиваючої синусоїдальної ґратки перебуває в межах приблизно 30–40 %. Таке низьке значення дифракційної ефективності насамперед пов'язане з наявністю декількох дифракційних порядків. Однією із основних вимог, які пред'являються до спектрального мульти/демультиплексора, є забезпечення якомога менших вносимих втрат у спектральні канали. Для мульти/демультиплексора з вгнутою дифракційною ґраткою вносимі каналні втрати напряму залежать від дифракційної ефективності вгнутої дифракційної ґратки. Тому, збільшення дифракційної ефективності вгнутої ґратки є дуже важливою задачею на шляху проектування ґратки для такого спектрального пристрою.

Серед різних типів дифракційних ґраток найкращі характеристики дифракційної ефективності мають ґратки з трикутним профілем штрихів, які називають концентруючими ґратками. Збільшення світлової потужності в робочому дифракційному порядку такої ґратки досягається шляхом орієнтації відбиваючої грані штрихів ґратки під кутом дзеркального відбивання в напрямку дифрагованої хвилі. Дуже часто для збільшення дифракційної ефективності голографічних ґраток проводять модифікацію профілю їх штрихів із синусоїдального у трикутний. Для таких цілей використовується метод іонного травлення. Важливим параметром при цьому є кут нахилу відбиваючої грані штриха, який називається кутом блиску. Задача є простою, коли є одна довжина хвилі. Проте, якщо ґратка працюватиме з хвилями деякого спектрального діапазону, то необхідно провести оптимізацію кривої дифракційної ефективності ґратки для цього спектрального діапазону, що здійснюється шляхом вибору оптимального значення кута блиску. Оскільки дифракційна ефектив-

ність вгнутої ґратки, яка буде використовуватись в мульти/демультиплексорі, є критичним параметром, то необхідно і важливо провести модифікацію синусоїдального профілю її штрихів у трикутний. Задача проектування при цьому зводиться до знаходження оптимального кута блиску. Для цієї мети було використано програму GSolver 4.20, за допомогою якої було знайдено оптимальний кут нахилу відбиваючої грані штрихів вгнутої ґратки у її центрі, який становить $12,7^\circ$. Таке значення кута блиску відповідає довжині хвилі блиску 550 нм , що є центральною довжиною хвилі робочого спектрального діапазону $400\text{--}700\text{ нм}$. Для відбиваючої ґратки з кутом блиску $12,7^\circ$ була порохована спектральна крива дифракційної ефективності для +1-го дифракційного порядку, яка наведена на рис. 8.

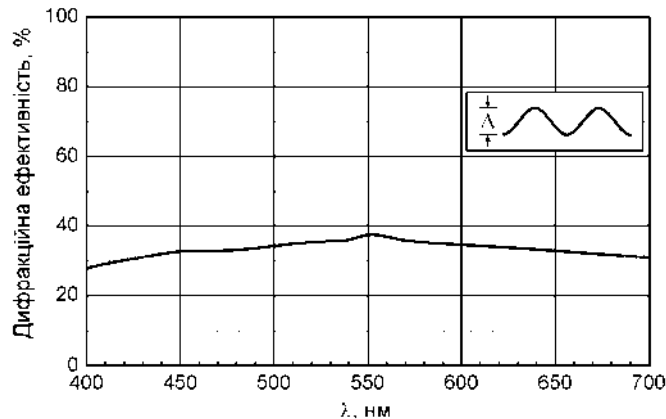


Рис. 7. Спектральна крива дифракційної ефективності для +1-го дифракційного порядку синусоїдальної відбиваючої ґратки (період штрихів – 1250 нм , глибина модуляції синусоїдального рельєфу – 150 нм , кут падіння – $17,5^\circ$)

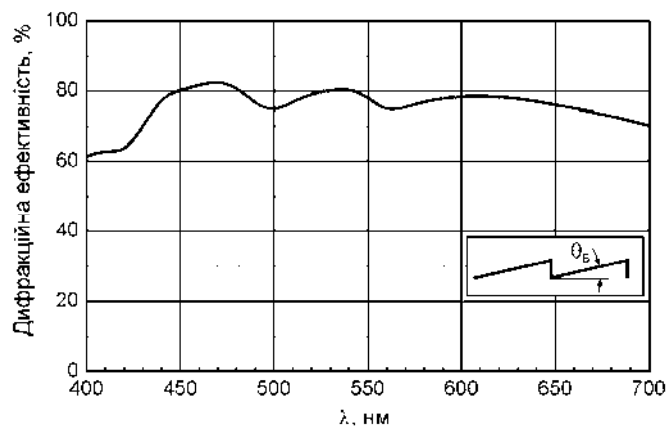


Рис. 8. Спектральна крива дифракційної ефективності для +1-го дифракційного порядку відбиваючої ґратки з трикутним профілем штрихів (період штрихів – 1250 нм , кут блиску – $12,7^\circ$, кут падіння – $17,5^\circ$)

Як видно з рис. 8, дифракційна ефективність для робочого порядку оптимізованої відбиваючої ґратки з трикутним профілем штрихів становить приблизно $70\text{--}80\%$. Отже, завдяки модифікації синусоїдального профілю штрихів у трикутний вдалося збільшити дифракційну ефективність в робочому порядку приблизно на 40% .

Задача оптимізації дифракційної ефективності для плоскої дифракційної ґратки є набагато простішою, ніж задача оптимізації дифракційної ефективності для вгнутої ґратки, оскільки період і орієнтація штрихів на поверхні вгнутої ґратки є різними для кожної точки поверхні. Здебільшого

використовують спрощений підхід. На рис.9,а показано, як змінюється період штрихів ґратки у площині Oxz (див. рис. 3). Якщо у центрі ґратки період дорівнює 1250 нм, то на краях ґратки при $x = -D/2$ та $x = D/2$ період штрихів становить відповідно 1306 нм і 1316 нм, де D – діаметр ґратки. Кут падіння світла на вгнуту поверхню ґратки для різних значень x також змінюється і на краях ґратки становить $16,7^\circ$ і $16,6^\circ$, відповідно. Приймаючи довжину хвилі блиску такою, що дорівнює центральній довжині хвилі робочого діапазону спектра, можна визначити як буде змінюватися кут блиску на вгнутій поверхні ґратки залежно від координати x (див. рис. 9, б). Проведені розрахунки кривих дифракційної ефективності для робочого діапазону довжин хвиль, враховуючи отримані параметри ґратки, для різних точок на вгнутій поверхні ґратки показали, що криві дифракційної ефективності майже не відрізняються від тої, яка зображена на рис. 8. Це свідчить про те, що сумарна теоретична дифракційна ефективність вгнutoї голографічної ґратки з оптимізованими параметрами становить не менше 70 %.

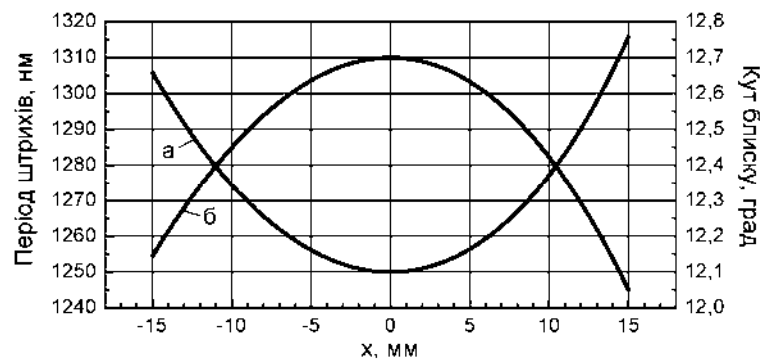


Рис. 9. Зміна періоду штрихів на поверхні ґратки (а) і кута блиску відносно площини дотичної до ґратки в точці з координатою x (б) у площині Oxz

Висновки

У роботі проведено розрахунок і оптимізацію параметрів вгнutoї голографічної дифракційної ґратки для використання у спектральному мульти/демультиплексорі, який застосовуватиметься для спектрального ущільнення каналів передавання в системах передавання даних із стандартними полімерними оптичними волокнами з поліметилметакрилату. Після отримання основних параметрів вгнutoї ґратки було проведено оптимізацію передавальних характеристик оптичної системи мульти/демультиплексора з вгнutoю голографічною ґраткою. З метою покращання фокусувальних характеристик вгнutoї ґратки і міжканального розділення майбутнього мульти/демультиплексора були мінімізовані аберації оптичної системи з вгнutoю ґраткою. Мінімізація аберацій здійснена шляхом оптимального розміщення точкових когерентних джерел для запису ґратки. Для оцінки аберацій спроектованої вгнutoї голографічної ґратки отримані зображення від торця вхідного волокна для різних спектральних каналів. Результати моделювання показали, що коефіцієнт зв'язку становить більше 90 %. З метою оцінки міжканальної розв'язки майбутнього мульти/демультиплексора отримано спектральні криві коефіцієнта зв'язку для різних спектральних каналів. Сусідні спектральні канали перекриваються на рівні 10%, що є достатньо добрим для практичного застосування. Варто зазначити, що на практиці перехідні міжканальні завади як правило є істотно меншими за рахунок того, що спектр випромінювання світловипромінювальних діодів має гауссівський профіль розподілу.

Для зменшення вносимих каналних втрат проведено оптимізацію дифракційної ефективності вгнutoї голографічної ґратки. Через низьку дифракційну ефективність синусоїдальних ґраток запропоновано модифікувати синусоїдальний профіль штрихів голографічної ґратки у трикутний профіль. Приймаючи те, що вгнута ґратка має трикутний профіль штрихів, проведено оптимізацію її дифракційної ефективності для робочого діапазону довжин хвиль шляхом вибору оптимального

значення кута блиску в різних точках на поверхні ґратки. На завершальному етапі роботи проведено оцінку дифракційної ефективності оптимізованої вгнутої ґратки. Теоретичне значення сумарної дифракційної ефективності для спроектованої вгнутої ґратки становить приблизно 70%, що цілком достатньо для її використання у спектральному мульти/демультиплексорі для систем передавання даних з полімерними волокнами.

1. *POF – polymer optical fibers for data communication* / W.Daum, et al. – Berlin: Springer, 2002.
2. Weinert A. *Plastic optical fibers: principles, components, installation*. – Erlangen-Muenchen: Publicis-MCD-Verl., 1999.
3. Наній О.Е. *Основы технологии спектрального мультиплексирования каналов передачи (WDM)* // *Lightwave Russian Edition*. – 2004. – № 2. – С. 47–52.
4. Senior J.M., Cusworth S.D. *Devices for wavelength multiplexing and demultiplexing* // *IEE Proceedings*. – 1989. – Vol. 136, No.3. – P. 183–202.
5. Watanabe R. et al. *Optical demultiplexer using concave grating in 0.7-0.9 micron wavelength region* // *Electronic Letters*. – 1980. – Vol. 16. – P. 106–107.
6. *Diffraction grating handbook, 6th edition* / by C. Palmer. – New York: Newport Corporation, 2005.
7. Стожарова К.А. *Аберрации вогнутых голографических дифракционных решеток 3-го типа в ультрафиолетовой области спектра* // *Оптико-механическая промышленность*. – 1981. – № 6. – С. 8–10.
8. Loewen E.G., Popov E. *Diffraction gratings and applications*. – New York: Marcel Dekker, 1997.
9. Chrisp M.P. *Aberration-corrected holographic gratings and their mountings* // *Applied optics and optical engineering*. – New York: Academic Press, 1987. – Vol. X. – P. 391–454.
10. Tsonev L., Popov E. *Focal spot estimation for concave diffraction gratings* // *Optics Communications*. – 1992. – Vol. 90, No. 1. – P. 11–15.