

УДК 535.241.5

Є. Є. Антонов, О. В. Шиховець

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Дифракційний контроль мікрорельєфу оптичних дисків

Досліджено дифракційні характеристики мікрорельєфу оптичних дисків з різним профілем пітів. Отримано калібрувальні криві дифракції для поляризованого лазерного випромінювання з метою визначення оптичних параметрів мікрорельєфу дисків. Розраховано дифракційні властивості багатошарових дискових структур, у тому числі з металізованими поверхнями.

Ключові слова: оптичний диск, дифракційний контроль, нахил стінок пітів, векторна модель дифракції, глибина мікрорельєфу, металізація дисків.

При формуванні мікрорельєфу оптичних дисків широко використовуються дифракційні методи контролю параметрів пітів [1–4]. Фактично інформаційний шар являє собою дифракційну ґратку, при освітленні штрихів цієї ґратки променем когерентного випромінювання виникає відповідна інтерференційна картина. Аналіз такої картини проводиться шляхом порівняння експериментально визначених кутів дифракції та розподілу інтенсивності дифрагованого випромінювання з відповідними розрахунковими даними і дозволяє зробити певні висновки щодо якості мікрорельєфу дискової структури.

Єдиної методики дифракційного контролю не існує: різні дослідники освітлюють мікрорельєф оптичних дисків лазерами з різною довжиною хвилі, використовують промені різних порядків дифракції, застосовують різні калібрувальні криві дифракції з метою вибору оптимальних режимів формування пітів необхідного профілю.

Систему дифракційного контролю рельєфу оптичних дисків розроблено і в Інституті проблем реєстрації інформації (ІПРІ) НАН України [5]. Функціонування цієї системи базується на відбитому від поверхні з фоторезистом світлі, відповідна апаратна її частина виготовлена на основі розрахунків процесу дифракції на пітах CD-формату з кроком інформаційних доріжок $d = 1500$ нм і шириною пітів $s = 600$ нм залежно від глибини пітів h . Для розрахунків співвідношення k_{DF} інтенсивності випромінювання 1-го порядку дифракції J_1 до повної інтенсивності про-

меня лазера J_F , яка падає на поверхню з мікрорельєфом, автори [5] використали формулу з роботи [4]:

$$k_{DF} = J_1 / J_F = (1/2\pi^2) [2 \sin(\pi s / d) \sin(2\pi h / \lambda)]^2. \quad (1)$$

Вираз (1) був отриманий авторами [4] для прямокутної форми пітів для повністю електропровідного середовища з коефіцієнтом відбиття поверхні $k = 1,0$ для випадку освітлення мікрорельєфу перпендикулярно утворюючій поверхні. В той же час, реальні інформаційні піти на оптичному диску мають нахил бокових стінок α до утворюючої поверхні в діапазоні $(30-60)^\circ$ [1], а мікрорельєф на станції контролю ППІ НАН України освітлюється лазером під кутом 10° . Тому отримана в роботі [4] розрахункова дифракційна ефективність $k_{DF} = J_1/J_F$ не повністю відповідає експериментальним даним щодо дифракції на мікрорельєфі.

Крім того, для контролю фактично використовується лише один сигнал J_1 , оскільки сигнал J_F практично незмінний. Унаслідок цього система втрачає свою універсальність: при зміні режиму запису (інший фоторезист або підкладка диска з іншого матеріалу) інтенсивність J_1 , яка прямо залежить від повної інтенсивності відбитих променів J_{ref} , також змінюється незалежно від зміни параметрів пітів. Тому більш універсальними є системи діагностики, в яких для контролю використовуються інтенсивності двох дифрагованих променів: 1-го порядку J_1 та 0-го — J_0 або 2-го — J_2 , якщо такий промінь існує.

Крім того, для розрахунків дифракційних кривих найчастіше використовується скалярна теорія дифракції [2, 3], яка не враховує поляризацію світла, при тому що лазерне випромінювання є поляризованим. У переважній більшості робіт [2-5] для розрахунків дифракційних явищ для оптичних кільцевих дисків застосовують спрощені моделі, в яких піти вважаються прямокутними. Тому такі розрахункові криві не придатні для точного калібрування систем дифракційного контролю.

Отже, для надійного контролю параметрів пітів необхідні детальні розрахунки процесу дифракції на мікрорельєфі оптичних дисків з урахуванням зазначених особливостей. Крім того, необхідно враховувати, що при травленні фоторезисту в певний момент починається відбиття світла окрім поверхні фоторезисту також і від підкладки диска, тому розрахунки необхідні саме для тришарових структур (повітря або травник, фоторезист, підкладка диска (скло, сапфір, хром). На даний час нам не відомі розрахунки таких тришарових систем.

Розрахункова модель

Для розрахунків розподілу інтенсивності різних порядків дифракції для поляризованого лазерного випромінювання використовувалася система розрахунків «PC Grate-6.1». Демонстраційна версія цієї програми надається для вільного користування компанією «International Intellectual Group, Inc.». Програма вирішує стандартне рівняння [6] дифракційної ґратки:

$$n_1 \sin(\theta_i) \cos(\varphi_i) - n_k \sin(\theta_{m,l}) \cos(\varphi_l) = -m \lambda/d, \quad (2)$$

де $\varphi_i = -\varphi_0$ — азимутальний кут падаючого променя; i — порядок рефракції або дифракції; індекс $l = 0$ для дифракції відбитих променів, $l = 1, 2, 3 \dots$ для випромі-

нювання, що пройшло ґратку; n_k — показники заломлення середовищ. Обчислення процесу дифракції здійснюється одразу для $N \leq 100$ зон на профілі одного періоду ґратки, тому форма ґратки може бути досить складною. Програма враховує поляризацію TE(P)/TM(S) випромінювання та дозволяє задавати необхідну форму дифракційної ґратки, період, крок і глибину рельєфу, кут освітлення та довжину хвилі променя лазера, кути та фази поляризації випромінювання, кількість та параметри окремих шарів ґратки. Одну з типових панелей завдання форми рельєфу наведено на рис. 1, на якому зображений трикутний профіль рельєфу з відстанню між шарами $L = 50$ нм і товщиною фоторезисту $h = 150$ нм для ґратки з періодом $d = 1500$ нм і шириною пітів $s = 600$ нм.

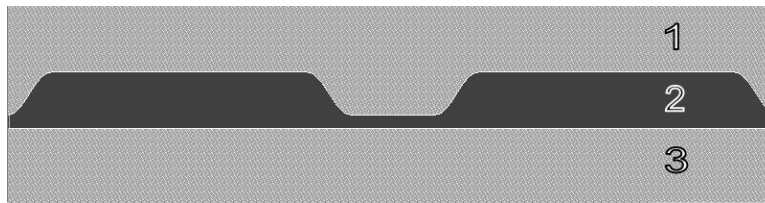


Рис. 1. Типова розрахункова форма ґратки: 1 — травник; 2 — фоторезист; 3 — підкладка

Для ілюстрації можливостей програми «PC Grate-6.1» було відтворено розрахунки Пасмана [1] для інтенсивності дифракційних порядків залежно від кутів нахилу α бокових стінок пітів для системи «травник – фоторезист – скло». Використовувалася модель травлення фоторезисту, запропонована авторами [1]: реальний переріз піта шириною s вздовж інформаційної доріжки замінювався трикутним профілем з такою ж базою s . При травленні зростала глибина піта h та нахил бокових стінок α до моменту досягнення заданої глибини піта h_0 . Після цього профіль набував вигляду трапеції, і зростав лише нахил бокових стінок пітів при їхній незмінній глибині h_0 . Зазначену схему зображено на рис. 2,а. Обчислення виконано для умов розрахунків авторів [1]: $d = 1670$ нм, $s = 600$ нм, $h_0 = 130$ нм, $\lambda = 633$ нм. Кут освітлення мікрорельєфу $\theta = 0^\circ$. Розглянуто травлення фоторезисту, що нанесене на оптичне скло, яке знаходиться в хімічному травнику з показником заломлення $n_1 = 1,33$. Показники заломлення фоторезисту n_2 та скла n_3 вважались однаковими і рівними 1,60, тобто розглянуто фактично двошарову структуру. Результати наших розрахунків наведено на рис. 2,б. Стрілка на рисунку вказує величину кута стінок піта α , при якому трикутний профіль перетворюється на трапецію.

Визначено відносні інтенсивності відбитих променів для 1-го порядку дифракції J_1 та 2-го порядку J_2 , які повністю відтворюють отримані раніше дані [1]. Однак крім того було отримано величини повної інтенсивності відбитих від поверхні дифрагованих променів $J_{\text{ref}} \approx 0,85\%$ та інтенсивності для 0-го порядку дифракції J_0 для кута $\alpha = 0^\circ$, тобто для плоскої поверхні без рельєфу, які співпадають з результатами простих розрахунків за формулами Френеля [7].

Повністю відтворюється також внесок поляризації світла, яка особливо суттєва для інтенсивності 2-го порядку дифракції J_2 (на рис. 2 суцільні лінії — TE(P)-поляризація, пунктир — TM(S)-поляризація, розмиті криві — скалярна теорія дифракції). Для інтенсивностей 0-го та 1-го порядків дифракції вплив поляризації

світла практично відсутній, тому для малих кутів $\alpha < 25^\circ$, що відповідають глибинам пітів $h < 130$ нм, векторна та скалярна моделі дають практично однакові результати.

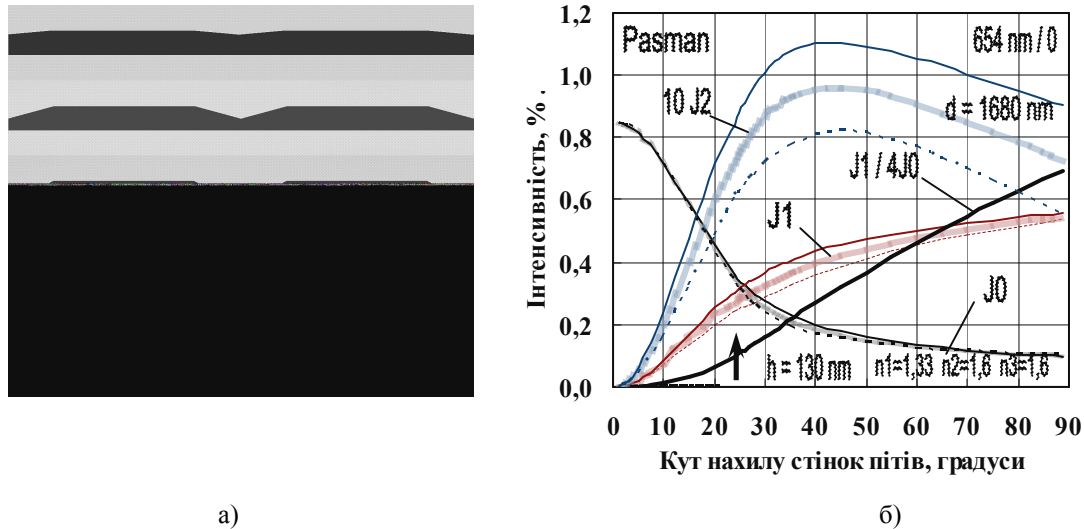


Рис. 2. Розподіл дифракційних інтенсивностей для умов розрахунків Пасмана [1]: а) схема травлення мікрорельєфу; б) дифракційні криві

Отже програма «PC Grate-6.1» дійсно дозволяє точно розраховувати дифракційні криві навіть для досить складних систем, зокрема, врахувати залежність інтенсивностей усіх порядків дифракції від кута нахилу α бокових граней пітів, що необхідно для аналізу параметрів мікрорельєфу за дифракційними кривими.

Особливістю розрахунків процесу дифракції світла на мікрорельєфі оптичних дисків є те, що рельєф займає лише частину площі S_D одиничної поверхні S_T диска. Вздовж інформаційних доріжок загальна довжина пітів становить близько половини загальної довжини доріжок, тобто так звана тангенційна скважність [1] запису $k_T \approx 50$ %. Оскільки стінки пітів не прямокутні, а досить похилі, а ширина пітів S найчастіше вимірюється на половині глибини пітів, стандартна величина $k_T \approx 60$ %. Таким чином, промінь, що падає на поверхню оптичних дисків з мікрорельєфом, відбивається від робочої одиничної поверхні диска S_T у вигляді двох складових. Перша дифракційна складова пов'язана з поверхнею S_D , другий промінь дзеркально відбивається від поверхні $S_R = S_T - S_D$. Для прозорих тонких шарів також існує і третій відбитий промінь від зворотної поверхні оптичного диска площею S_T . Кути дифракційного відбиття променя 0-го порядку φ_{D0} та дзеркального відбиття променів φ_R , звичайно, співпадають, тому при експериментальних вимірюваннях інтенсивності дифракції J_{0D} необхідно ці промені якось розподіляти.

Програма «PC Grate-6.1» таке дзеркальне відбиття не враховує. Тому при обчисленні інтенсивностей J_{0p} відбитого світла в напрямку нульовому порядку дифракції необхідно врахувати дзеркальне відбиття світла J_R від частини площі S_R робочої поверхні оптичного диска та від зворотної S_T його поверхні:

$$J_{0p} = \{J_{0D} S_D + J_R S_R + J_R (S_D + S_R)\} / S_D. \quad (3)$$

Оскільки тангенційна скважність $k_T = S_D/(S_D+S_R)$ [1], вираз (3) легко перетворити таким чином:

$$J_{0p} = J_{0D} + J_R (2 / k_T - 1). \quad (4)$$

Для металізованих непрозорих шарів третя складова ($J_R S_T$) відсутня, тому вираз для J_{0p} має такий вигляд:

$$J_{0p} = J_{0D} + J_R (1 / k_T - 1). \quad (5)$$

Вираз (5) також характеризує сумарну інтенсивність J_{0p} світла в напрямку нульового порядку дифракції для променів J_{trs} , що пройшли через мікрорельєф.

Величина k_T розраховувалася для кожного тестового оптичного диска індивідуально за фотографіями поверхні диска з мікроскопу «Neophot-2». Величина J_R також визначалась окремо для кожної розглянутої дискової структури для випадку нульової глибини рельєфу h . Зазначені корективи у визначенні величини J_{0p} було внесено до всіх результатів розрахунків за програмою «PC Grate-6.1» з метою можливості безпосереднього порівняння отриманих нами даних з результатами експериментальних вимірювань дифракційної ефективності $k_{D1} = J_1/J_{0p}$ для нульового порядку дифракції.

На рисунках для зручності всі значення J_{0p} нормовані на відповідне значення J_0 для глибини рельєфу $h = 0$. Розрахункові інтенсивності J_D для всіх порядків дифракції, окрім нульового, нормовані на одиничну інтенсивність променя лазера J_F , що освітлює мікрорельєф.

Розрахунки за програмою «PC Grate-6.1» було виконано для декількох стандартних режимів дифракційного контролю. Найбільший інтерес виявляють розрахунки дифракційних інтенсивностей для умов системи дифракційного контролю ІПРІ НАН України, а також для деяких інших перспективних систем контролю, зокрема, для системи дифракційного контролю станції автоматичного мастерінгу АМ-200 [8].

Використані при розрахунках значення показників заломлення [9] для всіх розглянутих середовищ залежно від довжини хвилі λ світла наведено в таблиці.

Показники заломлення для деяких середовищ

	$\lambda = 408$ нм		$\lambda = 532$ нм		$\lambda = 654$ нм	
	n	k	n	k	n	k
Cr	1,7057	3,6213	2,6571	4,1600	3,4477	4,2768
Ag	0,1383	1,9846	0,1429	3,0518	0,16016	3,9579
Al	0,48794	4,8085	0,50175	6,2097	1,3609	7,5189
Al ₂ O ₃	1,7852	0,0000	1,7717	0,0000	1,7659	0,0000
SiO ₂ (NS6)	1,5186	0,0000	1,5083	0,0000	1,5030	0,0000
PC	1,6114	0,0000	1,5917	0,0000	1,5788	0,0000

Вважалось, що коефіцієнт заломлення для водного хімічного травника $n_1 = 1,333$, коефіцієнт заломлення для фоторезисту «Shipley 1805», який використовується в ІПРІ НАН України для формування мікрорельєфу оптичних дисків, був

визначений експериментально методом еліпсометрії і становив $n_2 = 1,62$. Для полікарбонату РС використовувалося значення $n_2 = 1,585$, яке було визначено також методом еліпсометрії.

На першому етапі всі розрахунки було виконано для CD-формату. Виготовлені на станції лазерного запису ІПРІ НАН України для цього формату зразки мають період рельєфу $d = 1500$ нм і ширину пітів $s = 600$ нм. Дифракційний контроль здійснюється на відбитих від поверхні променях J_{ref} з використанням напівпровідникового лазера з довжиною хвилі $\lambda = 654$ нм. Кут освітлення мікрорельєфу $\theta = 10^\circ$.

Для системи дифракційного контролю станції автоматичного мастерінгу АМ-200 [8] використовується напівпровідниковий лазер з довжиною хвилі $\lambda = 532$ нм, кут освітлення рельєфу $\theta = 0^\circ$. Параметри пітів мікрорельєфу аналогічні вказаним.

Деякі з отриманих результатів наведено в наступних розділах роботи.

Тришарова система «Травник – фоторезист – прозора підкладка диска»

Така система реально виникає при традиційному формуванні мікрорельєфу оптичних дисків шляхом хімічного травлення фоторезисту, який нанесений на підкладку з оптичних прозорих матеріалів.

Оскільки програма «РС Grate-6.1» дозволяє розраховувати досить складні системи, на відміну від моделі Пасмана [1] стінки пітів моделювалися не прямими лініями, а синусно-трапецеїдальними кривими, що максимально наближає модель до реальності. Відмітимо, що використання різної форми стінок пітів при розрахунках практично не впливає на кінцеві результати.

Результати наших розрахунків за модернізованою моделлю Пасмана для тришарової структури з фоторезисту ($n_2 = 1,62$) товщиною $h_0 = 150$ нм на підкладках зі скла SiO_2 ($n_3 = 1,52$) та сапфіру Al_2O_3 ($n_3 = 1,775$) для відбитих променів «червоного» лазера з довжиною хвилі $\lambda = 654$ нм і кутом освітлення $\theta = 10^\circ$ наведено на рис. 3. Результати стосуються системи, яка розташована в повітрі ($n_1 = 1,00$), тому що іноді більш зручно контролювати процес травлення при періодичному висушуванні резисту та визначенні проміжних значень k_D для сухого фоторезисту для вирішення питання про доцільність продовження процесу травлення. Стрілка вказує точку, де глибина пітів h досягає величини h_0 , і відбувається перехід від трикутної форми піта до трапецеїдальної.

Розрахунки свідчать, що дифракційні інтенсивності за інших рівних умов в основному залежать від глибини пітів і кута нахилу стінок, які в моделі Пасмана [1] пов'язані між собою. Для сапфіру відбувається більш помітний порівняно зі склом перерозподіл інтенсивностей з 0-го порядку дифракції до 1-го порядку. Так, для глибини мікрорельєфу $h = 150$ нм для сапфіру інтенсивності J_1 та J_0 зрівнюються при кутах нахилу стінок пітів $\alpha \approx 40^\circ$. Для скла $J_1 \approx J_0$ лише при кутах $\alpha \approx 55^\circ$. Оптимальні значення дифракційної ефективності $k_{D1} = J_1/J_0$, які відповідають кутам нахилу пітів $\alpha = 45\text{--}50^\circ$, становлять 6,78–7,47 % для скла та 9,78–10,44 % для сапфіру. Відповідна величина ефективності $k_{DF} = J_1/J_F$ становить 1,00–1,08 % для скла та 1,66–1,77 % для сапфіру.

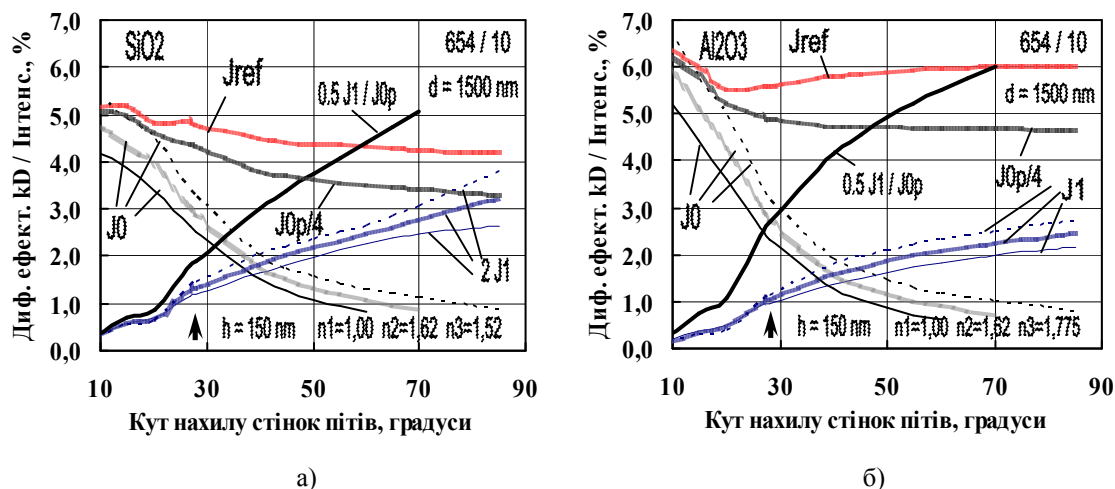


Рис. 3. Дифракційні криві для системи «повітря – фоторезист»: а) на поверхні скла SiO₂; б) сапфіру Al₂O₃

Основна відмінність системи контролю ППРІ НАН України від станції мас-терінгу АМ–200 [8] полягає в тому, що система АМ–200 функціонує із застосуванням «зеленого» лазера з довжиною хвилі $\lambda = 532$ нм з кутом освітлення $\theta = 0^\circ$ на променях $J_{\text{trс}}$, що пройшли мікрорельєф. Крім того, на станції АМ–200 оптичний диск освітлюється з боку підкладки, тому незалежно для сухого чи мокрого стану фоторезисту кути дифракції для відбитих променів залишаються незмінними і для CD-формату для 1-го порядку дифракції $\varphi_{1D} = 20,773^\circ$ та 2-го порядку $\varphi_{2D} = 45,181^\circ$. Для променів, що пройшли мікрорельєф, кути дифракції слабо змінюються для мокрого чи сухого стану фоторезисту і становлять приблизно $\varphi_{1D} = 12,646^\circ$, $\varphi_{2D} = 25,967^\circ$, $\varphi_{3D} = 41,056^\circ$, $\varphi_{4D} = 61,130^\circ$. Для DVD-режиму промені дифрагують лише в перших двох порядках, кути, відповідно, в 2 рази більші.

Для довжини хвилі $\lambda = 532$ нм для відбитих променів загальною інтенсивністю J_{ref} на рис. 4 наведено інтенсивності J_0 , J_1 та значення J_{0p} , які отримані з урахуванням дзеркального відбиття променів (рис. 4,а) для аналогічної системи «повітря – фоторезист – скло». Також для променів, що пройшли мікрорельєф за сторони підкладки загальною інтенсивністю $J_{\text{trс}}$, наведено інтенсивності $J_0 - J_4$ (рис. 4,б) для системи «повітря – скло – фоторезист».

Найбільш зручною для діагностики у відбитому світлі є дифракційна ефективність $k_{D1} = J_1/J_{0p}$, яка має максимум саме для пітів $h \sim 140-150$ нм. Такі глибини є оптимальними для фоторезисту для отримання при подальшому виготовленні оптичних дисків пітів глибиною $h \sim 100-120$ нм, що необхідно для надійного зчитування інформації.

Перехід від «червоного» до «зеленого» лазера призводить до виникнення, крім променів 0-го та 1-го порядків дифракції, також відбитих променів 2-го порядку J_2 , що розширює можливості контролю. Дійсно, величина дифракційної ефективності $k_{D2} = J_2/J_1$ значно менше залежить від кута нахилу стінок пітів α і визначається в основному глибиною пітів h , що підвищує надійність діагностики.

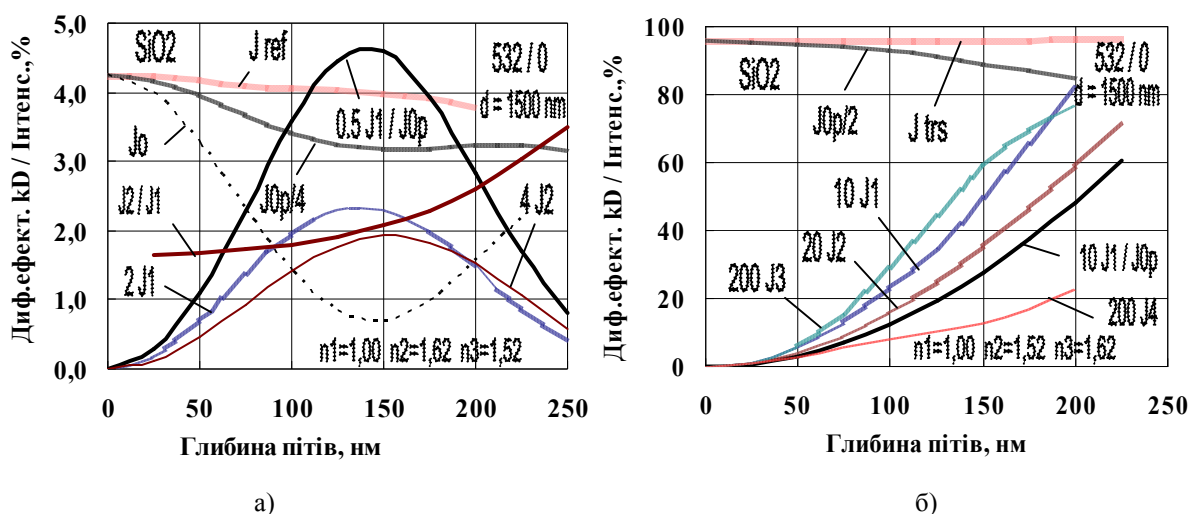


Рис. 4. Розподіл дифракційних інтенсивностей у повітрі для $\lambda = 532$ нм для фоторезисту на поверхні скла: а) для відбитих променів; б) променів, що пройшли мікрорельєф

Для лазерних променів J_{tr} , що пройшли мікрорельєф, виникають дифракційні промені навіть 3-го порядку J_3 та 4-го порядку J_4 . Однак дифракційні ефективності $k_{D2} = J_2/J_1$, $k_{D3} = J_3/J_2$ та $k_{D4} = J_4/J_3$ менш зручні для діагностики, перш за все, внаслідок труднощів у вимірюванні досить слабких інтенсивностей вищих порядків дифракції J_2 , J_3 та J_4 . У той же час, абсолютні значення $k_{D2}-k_{D4}$ не залежать від зміни величин J_F та J_0 , що важливо для створення надійної системи дифракційного контролю.

Відмітимо також, що для відбитих променів нахил кривих $k_{D1} = J_1/J_0 = f(h)$ для зони $h \sim 100-150$ нм значно більший порівняно з кривими $k_{DF} = J_1/J_F = f(h)$, тому для контролю якості пітів доцільно використовувати саме криві дифракційні ефективності k_{D1} .

Тришарова система «фоторезист – хром – травник/повітря»

Для створення оптичних дисків з сапфіру ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ – лейкосапфір) для довготривалого зберігання інформації перед нанесенням фоторезисту на сапфірові дискові поверхні пропонується [10] наносити маскуючий шар хрому з метою відведення електричного заряду та тепла при подальшому іонному травленні мікрорельєфу. Тому для контролю параметрів пітів у процесі формування мікрорельєфу необхідні також розрахунки дифракційних кривих для тришарових структур, в яких підкладкою для фоторезисту виступає хром.

Результати таких розрахунків для відбитих променів «червоного» лазера ($\lambda = 654$ нм, кут освітлення $\theta = 10^\circ$) для системи «фоторезист – хром», що знаходиться в повітрі та в травнику, наведено на рис. 5.

При переході від середовища n_1 («повітря») до n_1 («травник») зростає загальна інтенсивність відбитих променів J_{ref} , і це зростання в основному додається до інтенсивності 0-го дифракції J_0 . Розрахована інтенсивність J_0 для пітів з оптимальним кутом $\alpha \approx 45^\circ$ збільшується з 23,2 % до 41,3 %. У той же час, абсолютне

значення J_1 при цьому зменшується більш ніж у 2 рази (8,7 % для повітря проти 4,2 % для травника), тому ефективність $k_{D1} = J_1/J_0$ при цьому знижується майже в 4 рази, що ускладнює організацію контролю процесу травлення для мокрого фоторезисту.

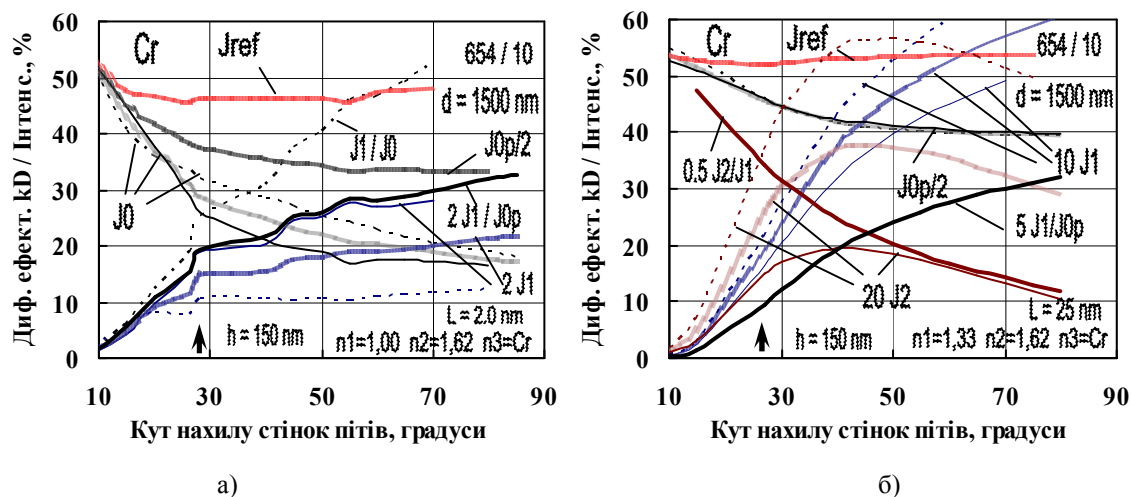


Рис. 5. Дифракційні інтенсивності для системи «фоторезист – хром»: а) у повітрі; б) у травнику

Однак при цьому зменшується роль поляризації світла для відбитих променів 1-го порядку, що є позитивним фактором. Крім того, з'являються промені 2-го порядку дифракції J_2 , тому для контролю процесу травлення можливо використовувати інтенсивності $k_{D2} = J_2/J_1$ та позбутися таким чином труднощів з виділенням інтенсивності J_0 із загальної інтенсивності J_{0p} в напрямку 0-го порядку дифракції. Оптимальне значення $k_{D1} = J_1/J_{0p}$ для кутів пітів $\alpha \approx 45-50^\circ$ становить 12,55–13,05 % для сухого фоторезисту та 4,36–4,81 % для мокрого резисту. Відповідне значення ефективності $k_{DF} = J_1/J_F$ становить 8,71–8,94 % для сухого резисту та 4,22–4,62 % для мокрого фоторезисту.

Сумарні дані щодо дифракції 1-го порядку для відбитих променів для трьох типових тришарових структур $n_1 = 1,00$; $n_2 = 1,62$, $n_3 = (\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Cr})$ для умов станції запису ІПРІ НАН України наведено на рис. 6.

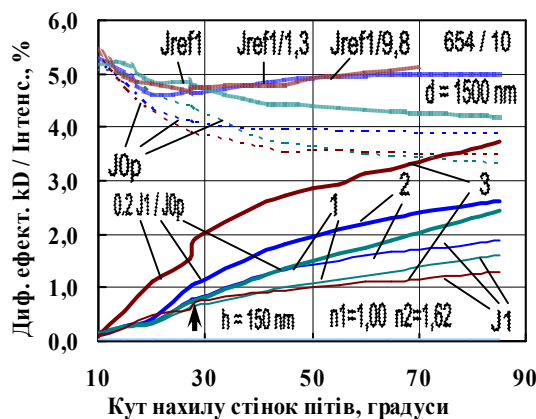


Рис. 6. Розподіл дифракційних інтенсивностей у повітрі для фоторезисту на поверхні скла, сапфіру та хрому: 1 — SiO_2 ; 2 — Al_2O_3 ; 3 — Cr

У розглянутому випадку дифракція відбувається у відбитому світлі, а коефіцієнт відбиття для скла, сапфіру та хрому різний. Тому зображені на рис. 6 інтенсивності відбитих променів J_{ref} для сапфіру та хрому пропорційно зменшено в 1,3 та 9,8 рази, відповідно. Таким чином, усі три значення J_{ref} вирівняні в точці $\alpha = 26,7^\circ$, в якій глибина пітів h при травленні досягає розрахункової величини $h_0 = 150$ нм. Будемо також вважати, що оптимальне значення дифракційної ефективності J_1/J_F для інтенсивності 1-го порядку дифракції при глибині пітів $h = 150$ нм відповідає куту пітів $\alpha = 45^\circ$.

Для підкладки зі скла SiO_2 для кута $\alpha = 45^\circ$ розраховане значення $k_{\text{DF}} = J_1/J_F \approx 1,0$ %. Експериментально отримане оптимальне для формування пітів значення k_{DF}^e відповідає відліку з фотодетектора ФД288А системи дифракційного контролю станції лазерного запису ІПРІ НАН України $A = 0,8$ В, тобто коефіцієнт перерахунку даних $kp = k_{\text{DF}}/k_{\text{DF}}^e = 1,25$ (%/В). Для підкладки з сапфіру Al_2O_3 розрахункове значення $k_{\text{DF}} = 1,66$ %, тому для величини $kp = 1,25$ оптимальне значення $A \approx 1,33$ В. Для маски з хрому Cr відповідне значення $k_{\text{DF}} = 9,35$ %, тому для $kp = 1,25$ оптимальний для формування пітів відлік з детектора $A \approx 7,48$ В. При використанні нейтрального фільтру з коефіцієнтом пропускання $\tau = 15$ % значення $A \approx 1,12$ В, і тому всі три інтенсивності J_1/J_F для скла, сапфіру та хрому можна вимірювати практично в однаковому діапазоні лінійності фотодетектора ФД288А.

Зазначені параметри контролю процесу травлення забезпечують формування оптимальних пітів у фоторезисті на станції лазерного запису ІПРІ НАН України.

Для випадку хімічного або іонно-плазмового формування пітів у шарі хрому після завершення етапу формування пітів у фоторезисті глибиною $h_0 = 150$ нм розрахована дифракційна ефективність $k_{\text{DF}} = f(h)$ ілюструється на рис. 7, де зображені інтенсивності відбитих променів для аналогічної системи «повітря – фоторезист – хром».

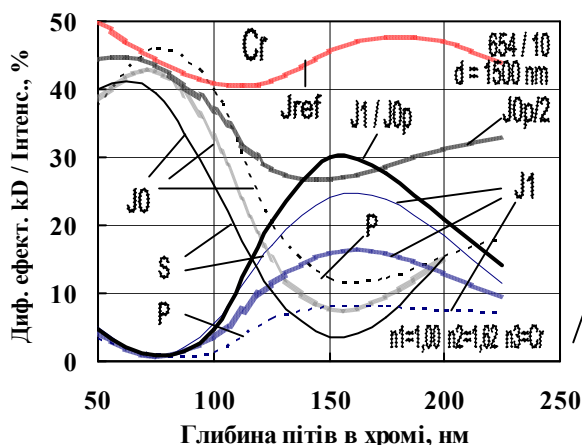


Рис. 7. Розподіл дифракційних інтенсивностей у повітрі для фоторезисту на поверхні скла, сапфіру та хрому: 1 — SiO_2 ; 2 — Al_2O_3 ; 3 — Cr

В області оптимальних глибин пітів у хромі $h \sim 130\text{--}150$ нм спостерігається істотний перерозподіл інтенсивностей між нульовим порядком дифракції ($J_0/J_F = 7,7$ %) та першим ($J_1/J_F = 16,0$ %) порівняно з початковим етапом процесу травлення хрому (наприклад, для $h \sim 75$ нм величина $J_0/J_F = 42,7$ % та $J_1/J_F = 0,7$ %).

Найбільш зручною для визначення оптимальної глибини пітів є дифракційна ефективність $k_{D1} = J_1/J_{0p}$, яка перебільшує значення ефективності $k_{DF} = J_1/J_F$ майже в 2 рази, і в області $h \sim 150$ нм становить близько 30 %. Крім того, для променів 1-го порядку дифракції виявляється дуже важливим типом поляризації променя лазера. Оскільки роль поляризації суттєва, різниця з експериментальними даними також може бути значною і основним методом контролю, мабуть, може бути лише порівняння отриманих ефективностей k_{D1} або k_{DF} з даними для еталонних дисків.

Двошарова система «повітря – мікрорельєф»

Криві дифракційної ефективності, що розраховані за тришаровою моделлю, перш за все, дозволяють здійснити поточний контроль процесу травлення фоторезисту. Однак, за наявності точних розрахункових даних можливо визначити глибину пітів для вже виготовлених оптичних дисків, наприклад, для штапованих «фабричних» з полікарбонату, а також для будь-яких металізованих дисків. Тому необхідні розрахунки дифракційних кривих залежно від глибини пітів і для двошарових структур з урахуванням реальної форми пітів.

Крім того, зазначена двошарова система виникає при контролюванні параметрів пітів у фоторезисті після завершення хімічного травлення та металізації мікрорельєфу.

Для випадку металізації мікрорельєфу шаром срібла на рис. 8 показані дифракційні криві для відбитих променів з довжиною хвилі $\lambda = 654$ нм і кутом освітлення $\theta = 10^\circ$ залежно від глибини рельєфу h для двох типових значень кутів пітів: $\alpha = 40^\circ$ (рис. 8,а) та $\alpha = 60^\circ$ (рис. 8,б).

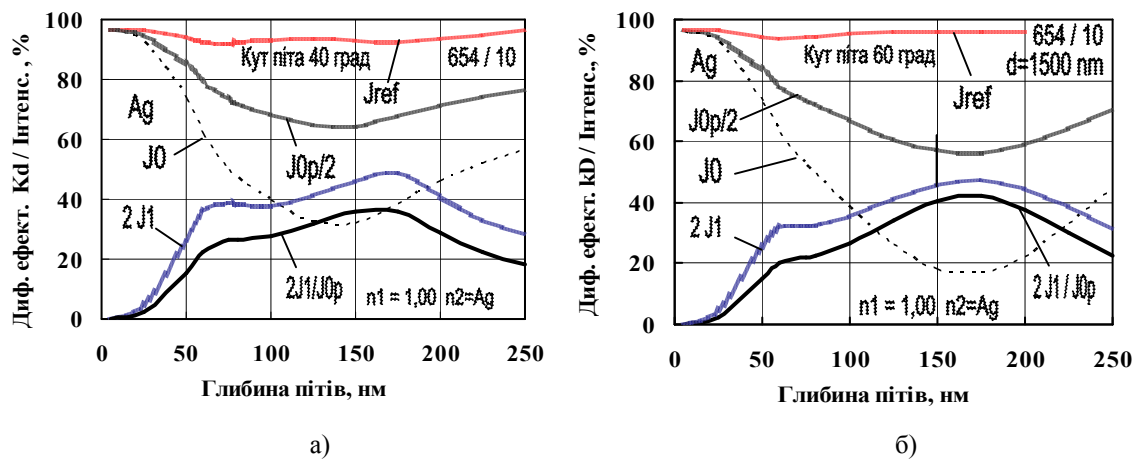


Рис. 8. Розподіл дифракційних інтенсивностей для поверхні мікрорельєфу з шаром срібла

Перш за все, для металізованих поверхонь майже відсутній вплив ефекту поляризації світла для променів 0-го та 1-го порядку дифракції. Тому на рис. 8 наведено дані лише для інтегральних інтенсивностей різних дифракційних порядків.

Відмітимо також, що практично відсутня залежність дифракційних кривих від кута нахилу пітів у діапазоні $\alpha = 40\text{--}60^\circ$, і величина $k_{D1} = J_1/J_{0p}$ визначається тільки глибиною пітів h . Для оптимальної глибини пітів на фоторезисті $h \sim 140\text{--}150$ нм значення дифракційної ефективності $k_{D1} \approx 40$ %. Це дійсно підтверджує

можливість визначення величини h за експериментально отриманими значеннями k_{D1} .

Основна відміна результатів розрахунків за двошаровою моделлю від тришарової полягає в тому, що криві дифракційної ефективності $k_{D1}=J_1/J_0$ в останньому випадку не мають максимуму, з ростом кутів нахилу стінок пітів α інтенсивність відбитих променів, зокрема 1-го порядку дифракції, продовжує зростати, в двошаровій моделі на залежності $k_{D1} = f(h)$ спостерігається максимум.

Для випадку металізації рельєфу шаром алюмінію дифракційні криві для зазначених вище умов мають дещо інший вигляд (рис. 9).

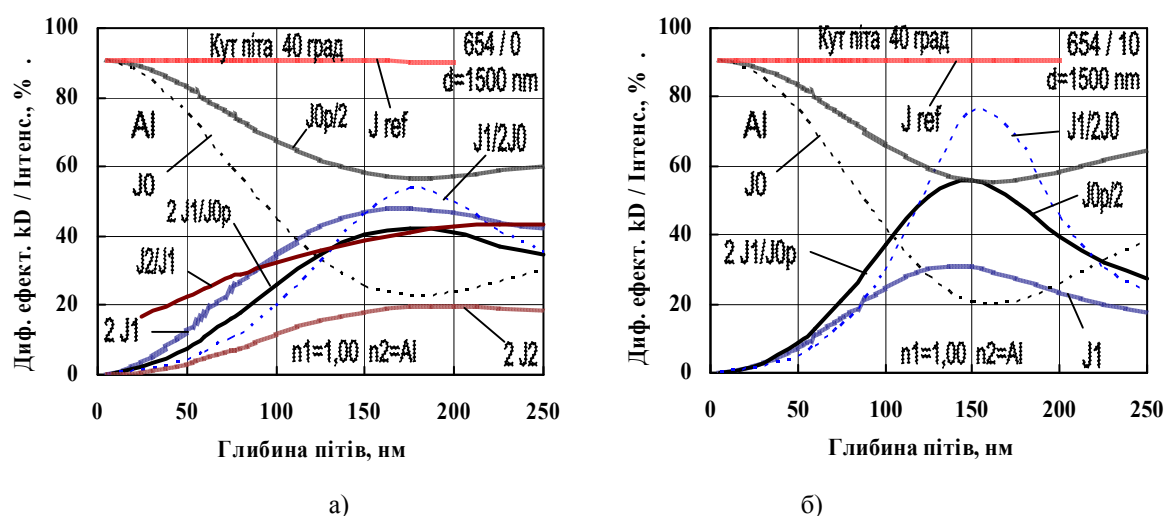


Рис. 9. Розподіл дифракційних інтенсивностей для поверхні мікрорельєфу з шаром алюмінію для двох кутів освітлення: а) $\theta = 0^\circ$; б) $\theta = 10^\circ$

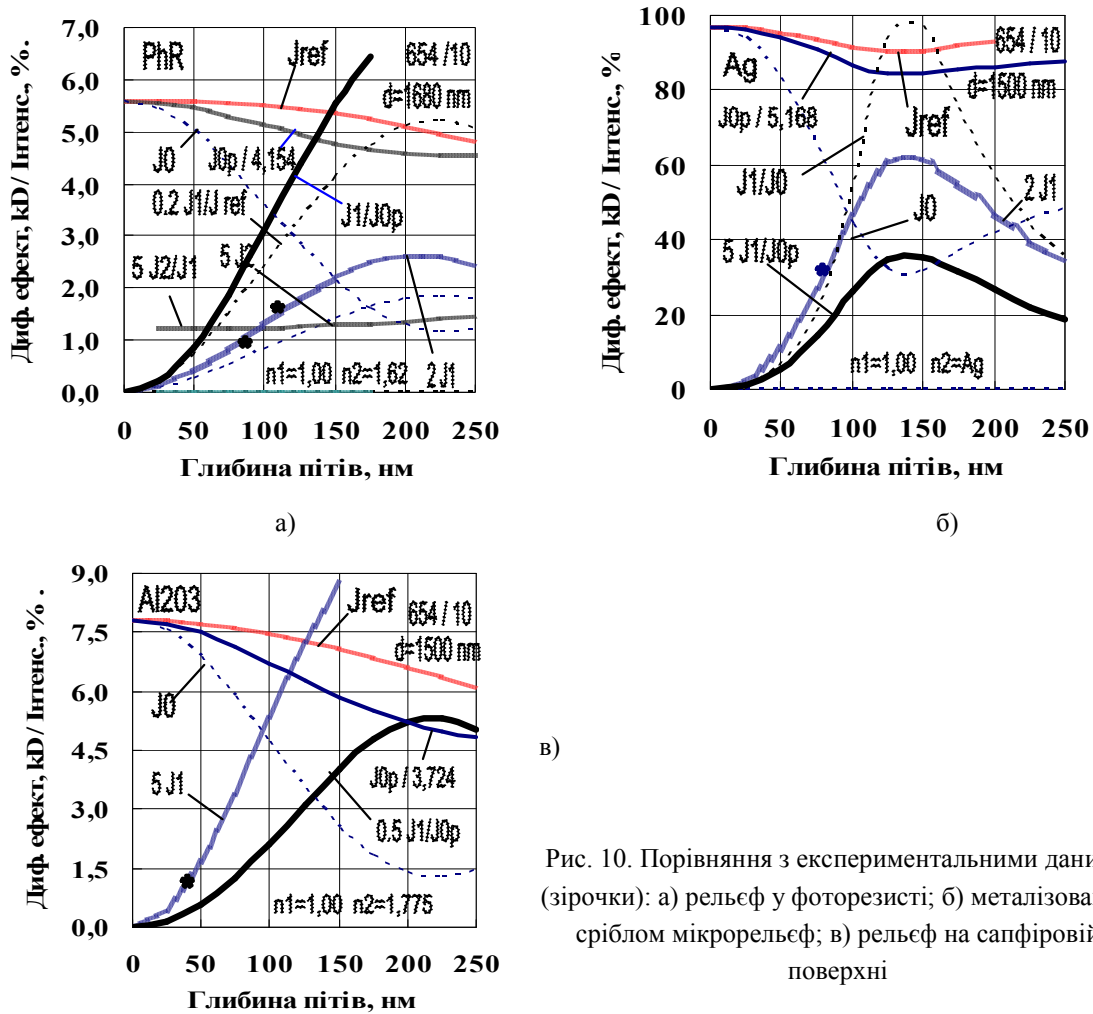
Для випадку металізації алюмінієм положення максимуму для дифракційної ефективності $k_{D1} = J_1/J_0$ і абсолютне значення k_{D1} аналогічно випадку металізації мікрорельєфу сріблом практично не залежать від кута нахилу стінок пітів α . Цей факт значно спрощує аналіз дифракційних кривих і визначення величини h за значеннями k_{D1} . Оптимальній глибині пітів на фоторезисті $h \sim 140\text{--}150$ нм для кута $\theta = 0^\circ$ відповідають значення ефективності $k_{D1} \approx 40\%$. Для кута освітлення $\theta = 10^\circ$ величина $k_{D1} \approx 55\%$.

При освітленні рельєфу під кутом $\theta = 0^\circ$ у спектрі з'являються інтенсивності 2-го порядку дифракції. На жаль, ці інтенсивності занадто малі порівняно з променями 0-го та 1-го порядків, тому їхнє надійне вимірювання досить складне. Крім того, крива дифракційної ефективності $k_{D2} = J_2/J_1$ має незначний нахил у зоні $h \sim 100\text{--}150$ нм (рис. 9,а). Тому основними для аналізу параметрів мікрорельєфу оптичних дисків у цьому випадку залишаються промені нульового та першого порядків дифракції.

Порівняння з результатами експериментальних досліджень

Для порівняння отриманих теоретичних даних з експериментальними значеннями дифракційної ефективності $k_{D1}=J_1/J_0$ було розраховано три прості двоша-

рові системи: рельєф у фоторезисті (рис. 10,а), металізований сріблом мікрорельєф (рис. 10,б), та рельєф на сапфірі (рис. 10,в), для яких експериментально було визначено дифракційні ефективності $k_{D1} = J_1/J_{0p}$ та $k_{DF} = J_1/J_F$ (на рис. 10 значення k_{DF} показані зірочками).



в)

Рис. 10. Порівняння з експериментальними даними (зірочки): а) рельєф у фоторезисті; б) металізований сріблом мікрорельєф; в) рельєф на сапфіровій поверхні

При моделюванні враховувалася реальна форма пітів, яка визначалась за допомогою атомно-силового мікроскопу (АСМ) типу «Dimension 3000». Для прикладу на рис. 11 зображено фотографію поверхні з мікрорельєфом (а) та реальні профілі пітів (б) рельєфу у сапфірі після іонного травлення хромової маски (зразок «TEST: SAP HR 04» від 15.10.15, дані АСМ від 25.10.15, trek # 3). Фоторезист з поверхні сапфіру видалено.

При розрахунках профіль пітів моделювався трапецією зі стінками синусоїдальної форми, відповідно до даних з АСМ. Реальні кроки d мікрорельєфу на фоторезисті, сапфірі та сріблі, які було встановлено за кутами дифракції променів, становили 1680, 1500 та 1500 nm, відповідно. Для сапфіру використовувалося значення $d_D = 1500$ nm, яке визначено з експериментально отриманого кута дифракції $\varphi_1 = 37,75^\circ$ і яке дещо відрізняється від даних АСМ, згідно з якими період рельєфу

$d_{\text{AFM}} \approx 1650$ нм, глибина пітів $h = 145$ нм, ширина $s = 825$ нм (зверху), $s = 150$ нм (знизу), тобто кут нахилу стінок пітів $\alpha \approx 22^\circ$.

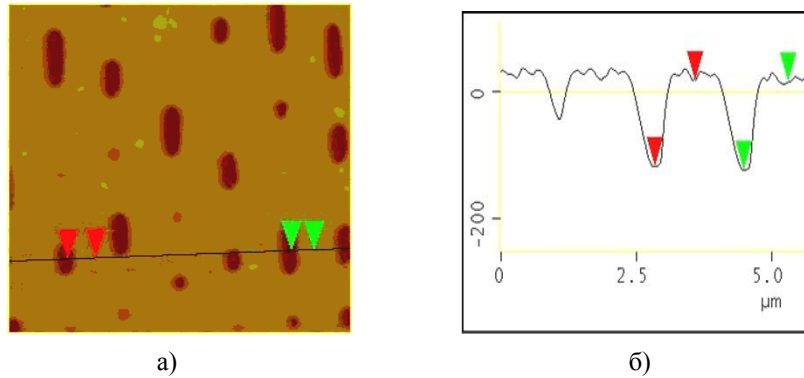


Рис. 11. Дані з АСМ-мікроскопу: а) фотографія рельєфу; б) форма пітів

Дані рис. 10 свідчать, що положення експериментальних значень $k_{\text{DF}} = J_1/J_F$ на розрахункових дифракційних кривих $k_{\text{DF}} = f(h)$ визначає розумні величини глибин мікрорельєфу $h \sim 90\text{--}120$ нм. Значення $h \approx 40$ нм для сапфіру, яке відповідає експериментально визначеній ефективності $k_{\text{DF}} = 1,4\%$ (рис. 10,в) здається дещо малим, однак це є усереднене за площею значення і воно пов'язане з малою тангенційною скважністю $k_T = 0,286$ для інформаційного рельєфу на сапфірі (рис. 11,а).

Таким чином, з експериментальних значень $k_{\text{DF}} = J_1/J_F$ за наявності точних розрахункових дифракційних ефективностей $k_{\text{DF}} = f(h)$ дійсно можна визначити глибини пітів реального мікрорельєфу оптичних дисків.

Висновки

Запропоновано модель розрахунків тришарових оптичних дискових систем з урахуванням дзеркального відбиття променів і специфіки оптичних дисків, зокрема з маскуючим шаром металу. Виконано конкретні розрахунки дифракційної ефективності для системи контролю станції лазерного запису ІПРІ НАН України та отримано точні калібрувальні криві дифракції на мікрорельєфі дисків для організації контролю процесу травлення фоторезисту.

Запропоновано метод визначення глибини рельєфу оптичних дисків за дифракційною ефективністю мікрорельєфу з урахуванням тангенційної скважності інформаційного рельєфу та отримано робочі криві дифракційних інтенсивностей для визначення глибини інформаційних пітів різних дискових структур.

1. Оптические дисковые системы / Г. Боухьюз, Дж. Братт, А. Хейсер [и др.]. — М.: Радио и связь, 1991. — 280 с.

2. Ленкова Г.А. Особенности распределения интенсивности в дифракционном спектре амплитудно-фазовых решеток / Г.А. Ленкова // Автометрия. — 1992. — Т. 5. — С. 14–26.

3. Коронкевич В.П. Дифракционный метод контроля параметров дорожек форматированных дисков / В.П. Коронкевич, Г.А. Ленкова // Автометрия. — 1992. — Т. 5. — С. 3–13.

4. Гончаровский А.В. Введение в компьютерную оптику / А.В. Гончаровский, В.В. Попов, В.В. Степанов. — Изд-во МГУ, 1991. — 312 с.
5. Атаев В.А. Система дифракционного контроля процесса травления диска-оригинала / В.А. Атаев, В.Г. Кравец // Ресстрація, зберігання і оброб. даних. — 2002. — Т. 4, № 1. — С. 28–34.
6. *Multilayer resonant subwavelength gratings: effects of waveguide modes and real groove profiles* / L.I. Goray, I.G. Kuznetsov, S.Yu. Sadov, D.A. Content // J. Opt. Soc. Am A. — 2006. — Vol. 23(1). — P. 155–165.
7. *Microprisms: optical parameters and monitoring* / E.E. Antonov, A.A. Kryuchyn, Mingley Fu, [et al.]. — Kyiv: Akadempriodyka, 2015. — 146 p.
8. *Automatic Mastering AM-200* / Toolex N.V., P.O. Box 7005, 5605 JA Eindhoven, The Netherlands.
9. *Интернет-ресурс*: [http.: // www.RefractiveIndexes.INFO](http://www.RefractiveIndexes.INFO).
10. *Method of aberration compensation in sapphire optical disks for the long term data storage* / V.V. Petrov, V.P. Semynozhenko, V.M. Puzikov [et al.] // Functional Materials. — 2014. — Vol. 21(1). — P. 105–111.

Надійшла до редакції 07.04.2016