

**В.А. Данько, І.З. Індутний,
М.В. Луканюк, В.І. Минько, П.Є. Шепелявий**

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ

ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ГОЛОГРАМНИХ ДИФРАКЦІЙНИХ ҐРАТОК НА ОСНОВІ НЕОРГАНІЧНИХ ВАКУУМНИХ ФОТОРЕЗИСТІВ



Виконано інноваційний проект з розробки технологічного методу формування голограмних дифракційних ґраток, який дає можливість виготовляти високоякісні дифракційні елементи з просторовими частотами від 600 до 3600 мм⁻¹ для спектральних приладів. Розроблено технологічні інструкції по реалізації цього методу та виготовлено експериментальні зразки. Встановлено, що характеристики виготовлених в рамках даного проекту експериментальних зразків голограмних дифракційних ґраток відповідають технічному завданню та ДСТ 3-6128-86.

Ключові слова: дифракційні ґратки, халькогенідні фоторезисти, спектральні прилади.

Голограмні дифракційні ґратки використовуються як диспергуючі елементи в різноманітних спектральних приладах. Протягом багатьох років такі прилади широко використовувались і продовжують використовуватись у фізичних, астрономічних, хімічних, біологічних та інших дослідженнях, у різних галузях промисловості (металургійна, харчова, хіміко-технологічна і т. ін.), в медицині, охороні довкілля. Крім того, дифракційні ґратки використовуються для збільшення пропускну здатності волоконно-оптичних мереж, в інтегрально-оптичних пристроях та в лазерах зі змінними частотами. Ні дифракційні ґратки, ні спектральні прилади на їх основі в Україні не виготовляються. А потреба в таких приладах досить велика, зокрема для проведення медико-біологічних досліджень і аналізів (особливо при діагностиці інфекційних захворювань на ранніх стадіях), спектральних аналізів в ме-

талургійній промисловості, екологічних досліджень та аналізів тощо.

Основним завданням інноваційного проекту була розробка технології виготовлення голограмних дифракційних ґраток в широкому діапазоні просторових частот з використанням вакуумних фоторезистів на основі шарів халькогенідних стекел. Ці фоторезисти розроблені та запатентовані Інститутом фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ і мають ряд унікальних характеристик, зокрема роздільну здатність до 1 нм. Порівняно з існуючими аналогами розроблений халькогенідний фоторезист характеризується термічною стійкістю (до 300 °С), відсутністю усадок під час післяекспозиційної обробки, механічною міцністю та хімічною стійкістю. Халькогенідні фоторезисти можуть наноситись за допомогою термічного осадження у вакуумі як на плоскі підкладки, так і на виробі складної форми. Тому розроблені фоторезисти дуже перспективні для запису голограмних дифракційних елементів, в тому числі дифракційних ґраток.

Розробка технологічних процесів виробництва голограмних ґраток включає розробку та монтаж оптичних схем, оптимізацію процесів нанесення вакуумного халькогенідного фоторезисту, експонування, післяекспозиційної обробки, нанесення відбиваючих та захисних покриттів. Для оптимізації параметрів та режимів цих процесів крім експериментальних досліджень необхідні теоретичні розрахунки та чисельне моделювання процесів формування профілю штрихів ґраток, які забезпечують необхідний спектральний розподіл дифракційної ефективності.

**РОЗРОБКА ОСНАСТКИ І ОПТИЧНИХ СХЕМ
ДЛЯ ЗАПИСУ ГОЛОГРАМНИХ ҐРАТОК
ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ВАКУУМНОГО
НАНЕСЕННЯ ХАЛЬКОГЕНІДНОГО ФОТОРЕЗИСТУ**

Інтерференційний запис голограмних оптичних елементів, в тому числі і дифракційних ґраток, може бути здійснений тільки при умові стабільності робочої схеми під час запису. Для забезпечення температурної та механічної стабільності оптичні схеми були зібрані в підвальному приміщенні на віброзахисних бетонних плитах вагою 1,5 т, які, в свою чергу, були розміщені на масивних (40 т) фундаментах, ізольованих від фундаменту будівлі та встановлених на демпфуючих прокладках. Приміщення оснащено припливно-витяжною вентиляцією та задовольняє всім технологічним вимогам.

Оптична схема для запису голограмних ґраток показана на рис. 1. Запис здійснюється таким чином. Промінь лазера за допомогою просторового фільтра та сферичного дзеркала перетворюється в розширений пучок з плоским хвильовим фронтом. Далі пучок світла спрямовується на подільник, де розділяється на дві частини за потужністю у співвідношенні близько 1 : 1. Обидві частини пучка за допомогою плоских дзеркал направляються на пластину з фоторезистом, на поверхні якої в результаті суперпозиції когерентних світлових фронтів формується інтерференційне поле.

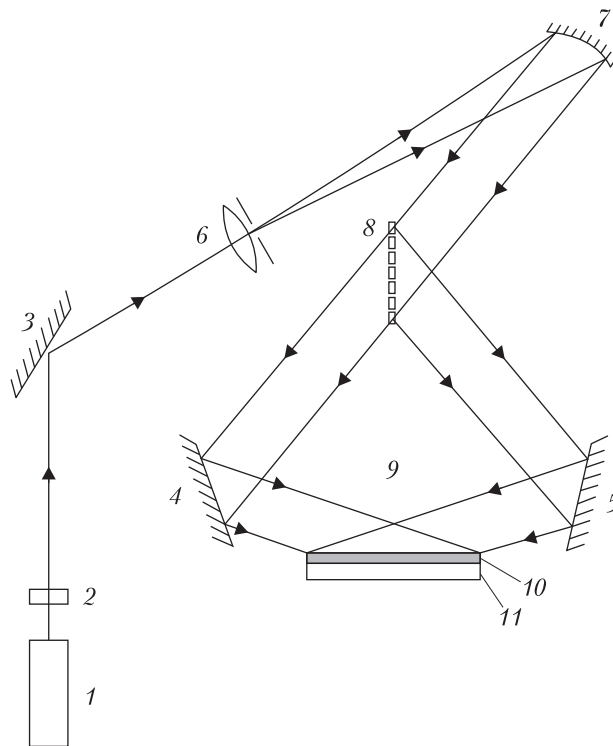


Рис. 1. Оптична схема для запису голограмних ґраток: 1 – лазер, 2 – затвор, 3, 4, 5 – плоскі дзеркала, 6 – просторовий фільтр, 7 – сферичне дзеркало, 8 – подільник світлового променя, 9 – інтерференційне поле, 10 – шар фоторезисту; 11 – підкладника

На рис. 2 показана оптична схема, зібрана на віброзахисній плиті в приміщенні з контрольованою температурою та вологістю. Схема змонтована на основі аргонного лазера ЛГ-503 з робочою довжиною хвилі 514,5 нм. Спектральний діапазон і потужність випромінювання (1 Вт) цього лазера оптимальні, якщо як реєструючі середовища використовувати неорганічні фоторезисти на основі халькогенідних стекл.

Основним методом нанесення халькогенідних фоторезистів є термічне напилення в вакуумі. Відомо, що їх резистні властивості (тип розчинності, селективність травлення) визначаються не тільки складом халькогеніду і рецептурою протравлювача, але й істотним чином залежать від умов нанесення (температу-

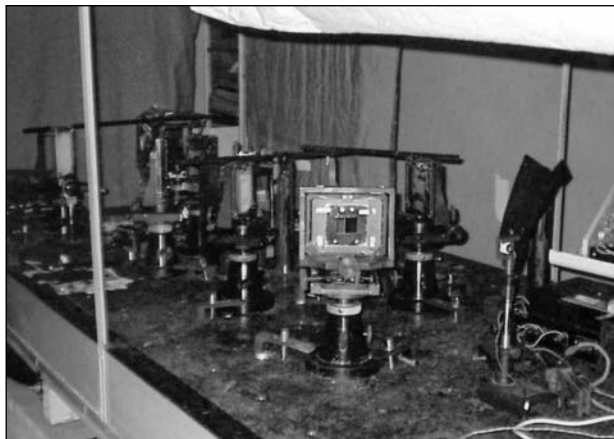


Рис. 2. Оптична схема для реалізації запису голограмних ґраток, змонтованої на віброзахищеному фундаменті

ри підкладки і швидкості осадження на неї плівки халькогеніду) [1–3]. З метою відтворення властивостей і характеристик фоторезистивних шарів умови нанесення шарів вибирались такими:

- ✦ термічне випаровування халькогенідів проводилось при залишковому тискові у вакуумній камері не нижче 10^{-3} Па;
- ✦ температура підкладки при осадженні шару халькогеніду була кімнатною;
- ✦ швидкість осадження підтримувалась в межах 1–2 нм/с.

Товщина шару і швидкість його осадження контролювалися в процесі осадження кварцевим вимірювачем товщини (КИТ-1) або методом оптичної інтерферометрії. Вимірювання абсолютних значень товщини нанесених шарів і контроль їх однорідності проводилися за допомогою мікроінтерферометра МИИ-4, профілометра «Talystep» та еліпсометра ЛЭФ-3М. Була спроектована та виготовлена оснастка для нанесення халькогенідного фоторезисту на скляні пластини за допомогою випаровування у вакуумі.

З метою оптимізації технологічного процесу осадження халькогенідів у вакуумі проведено також комп'ютерне моделювання розподілу товщини фоторезисту на пластині. З використанням результатів моделювання та експеримен-

тально оптимізованих режимів термічного випаровування нанесено шари халькогенідного фоторезисту з товщинами від 200 до 600 нм і неоднорідністю по товщині не більше 5 % на пластинах для запису голограмних дифракційних ґраток з розміром робочої зони 50×50 мм.

Були оптимізовані також товщини халькогенідних фоторезистів для запису ґраток різних просторових частот з урахуванням величини селективності протравлювача. Для забезпечення хорошої адгезії плівки фоторезисту та запобігання багатократного відбиття світла від задньої поверхні підкладки перед нанесенням шару халькогеніду проводилось осадження шару хрому товщиною 30–80 нм.

Всього в розробленому технологічному процесі включено чотири технологічні ділянки: *вакуумна* (нанесення функціональних шарів), *голографічна* (запис інтерференційної картини), *хімічна* (промивка та селективне травлення) та *оптична* (контроль характеристик ґраток). Крім того, контроль морфології рельєфу поверхні ґраток проводиться за допомогою атомно-силового мікроскопа.

При виконанні проекту були розроблені та виготовлені стенди для вимірювання спектральної залежності дифракційної ефективності голограмних ґраток у видимій області спектра та кутового розподілу дифракційної ефективності. Дифракційна ефективність η визначалася як відношення інтенсивності світла I_1 , дифрагованого в заданий порядок дифракції, до інтенсивності світла I_0 , яке падає на структуру, тобто $\eta = 100 \% I_1 / I_0$. Ефективність вимірювалась по схемі, близькій до схеми Літрова. Величина кута між падаючим та дифрагованим променями становила від 7 до 10° .

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ЕКСПОНУВАННЯ, ПІСЛЯЕКСПОЗИЦІЙНОЇ ОБРОБКИ, НАНЕСЕННЯ ВІДБИВАЮЧИХ ТА ЗАХИСНИХ ПОКРИТЬ

Важливим етапом розробки технології запису голограмних ґраток є оптимізація умов експонування та обробки. У процесі експонування халькогенідного фоторезисту відбуваються

фотостимульовані структурні перетворення такого світлочутливого шару, в результаті чого в експонованих областях відбуваються зміни його оптичних та хімічних властивостей (швидкості розчинення в селективному протравлювачі) [1–4]. Рівень цих перетворень визначається кількістю світлової енергії, поглинутої в даному локальному об'ємі халькогенідної плівки. Тому для коректного опису процесу експонування було розраховано тривимірний розподіл інтенсивності світлового поля в процесі інтерференційного експонування такої тонкоплівкової структури. Величина експозиції виражається добутком інтенсивності на час експонування. Кількість поглинутої енергії в даній точці об'єму фоторезистного шару пропорційна добутку експозиції в даній точці на коефіцієнт поглинання. Ця кількість визначає ступінь фотостимульованих перетворень в шарі фоторезисту, а значить і зміну його розчинності в селективному протравлювачі. При експонуванні монохроматичним випромінюванням (як у нашому випадку) коефіцієнт поглинання постійний і зміна розчинності фоторезисту визначається розподілом інтенсивності світла.

Таким чином, швидкість селективного травлення халькогеніду після інтерференційного експонування визначається в основному двома факторами: розподілом інтенсивності світла в шарі та залежністю швидкості розчинення халькогенідного фоторезисту в протравлювачі від експозиції. Ця залежність для кожного фоторезисту визначається експериментально [5]. Одержані експериментальні та теоретичні залежності (розподіл інтенсивності світла при експозиції тонкоплівкової структури та швидкість розчинення фоторезисту) були використані для числового моделювання процесу формування дифракційної ґратки на шарах халькогенідних фоторезистів. В основу моделювання покладено припущення про те, що кожна точка контуру, який описує профіль рельєфної структури ґратки, в процесі травлення переміщується по нормалі до поверхні зі швидкістю, пропорційною швидкості травлення. При цьому

форма контуру і, відповідно, напрямки нормалей неперервно змінюються.

З використанням описаного алгоритму було розроблено пакет програм для чисельного моделювання процесу селективного травлення халькогенідного фоторезисту після інтерференційного експонування, тобто процесу формування голограмних дифракційних ґраток. Із застосуванням чисельного моделювання можна прослідкувати процес формування рельєфу та визначити, від яких факторів технологічного процесу (експозиція, час травлення, селективність) в основному залежать параметри отриманих ґраток.

Такі чисельні розрахунки були проведені для халькогенідних фоторезистів на основі складу $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$, $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$, $\text{As}_{40}\text{S}_{20}\text{Se}_{40}$, $\text{As}_{40}\text{S}_{40}\text{Se}_{20}$, $\text{Ge}_{25}\text{Se}_{75}$. Отримані закономірності були використані при оптимізації технологічних процесів виготовлення голограмних дифракційних ґраток на основі халькогенідних фоторезистів [6–13].

З прийняттям як бази результатів комп'ютерного моделювання здійснювався вибір складу селективних протравлювачів, які забезпечували необхідні параметри мікрорельєфу під час травлення та параметри процесів експонування і травлення. В залежності від технологічних режимів нанесення (температура підкладки, швидкість осадження) та умов післяекспозиційної обробки (рецептура протравлювача, температура відпалу шару халькогеніду) резистні шари халькогеніду можуть проявляти як негативний, так і позитивний тип фотостимульованої зміни розчинності. Основними критеріями при виборі протравлювачів для резистних шарів халькогеніду є достатньо висока їх селективність і якість травленої поверхні. Взагалі вони не є взаємозв'язаними, і їх пріоритет встановлюється залежно від конкретного практичного застосування. Так, наприклад, при використанні шарів халькогеніду для формування захисних масок в процесах оптичної мікролітографії (виготовлення мікроелектронних пристроїв) важливу роль відіграє селектив-

ність протравлювача, від якої залежить товщина резистного шару, що залишається на підкладці після його травлення. Для технологічних процесів лазерної та голографічної літографії (виготовлення оригіналів оптичної сигналограми або розміточної структури, голографічних дифракційних ґраток, елементів інтегральної оптики тощо) істотне значення має якість поверхні резистного шару після травлення, що є визначальним стосовно відношення до експлуатаційних характеристик виробів (співвідношення сигнал/шум та рівень розсіяного світла).

У попередніх дослідженнях та розробках для негативного травлення резистних шарів халькогеніду використовувалися розчини неорганічних та органічних реагентів [2, 14, 15]. Характерними недоліками протравлювачів першого класу є невисока селективність і неоднорідність процесу травлення, а також наявність в них іонів лужних металів, внаслідок чого вони не можуть використовуватися при виготовленні мікроелектронних приладів. Більш придатними є протравлювачі на основі органічних реагентів, зокрема аміаку та його похідних (амінів), яким властиві високі показники селективності і однорідності процесу травлення. Значною мірою характер дії цих протравлювачів зумовлений розчинником органічного реагенту, який істотно впливає не тільки на величину селективності, але й може привести до інверсії фотостимульованої зміни розчинності одного і того ж халькогеніду. Наприклад, для шарів $As_{40}S_{60}$ розчини диметиламіну у воді та в ізопропиловому спирті [16] є позитивними травниками, а в диметилсульфоксиді або бензонітрилі [17] — негативними. У результаті досліджень фотостимульованих змін розчинності резистних шарів $As_{40}S_{60-x}Se_x$, де $x = 0; 20; 30; 40$, для них були розроблені двокомпонентні селективні протравлювачі негативного типу. Для бінарного складу $As_{40}S_{60}$ таким протравлювачем є розчин гідроксиду аміаку в диметилкетоні. Для шарів потрійного халькогеніду складу $As_{40}S_{60-x}Se_x$, де $x = 20; 30; 40$, найбільш оптимальними є розчини, що містять етилендіамін і диметилкетон.

У рамках даного проекту були також досліджені протравлювачі на основі бутиламіну, пропіламіну, діетиламіну, диметиламіну, етилендіаміну та ін. Досліди показали, що найкращі параметри (селективність 10–20, лінійна залежність висоти рельєфу від експозиції, однорідність обробки та ін.) забезпечує травник на основі етилендіаміну ($NH_2CH_2CH_2NH_2$). Як розчиник використовували диметилсульфоксид.

Оптимальний час селективного травлення вибирається експериментально з врахуванням результатів комп'ютерного моделювання та умов одержання максимальної дифракційної ефективності η . Залежність η від часу обробки має вигляд кривої з максимумом. Це зумовлено тим, що оптимальна селективність не є абсолютною і відношення швидкості розчинення експонованих та неекспонованих ділянок шару ХС становить 10–20. Під час травлення величина η контролювалась за допомогою освітлення нефотоактивним світлом гелій-неонового лазера (довжина хвилі — 632,5 нм). Після виходу значення η на максимум травлення зразка припинялося.

Оптимальна величина експозиції чи час опромінення при постійній інтенсивності теж вибиралися експериментально для конкретних параметрів світлочутливих шарів, виходячи із умов одержання максимальної дифракційної ефективності η . Максимум η досягається при такій експозиції, коли в місцях, що відповідають максимумам інтерференційної картини, фотоструктурні перетворення були близькими до насичення. Оскільки оптичні схеми, які формують інтерференційну картину, не ідеальні (модуляція інтерференційної картини в товщині шару фоторезисту не 100 %), то після досягнення насичення в максимумах продовжується засвічення мінімумів, світлочутливе середовище вуалюється і дифракційна ефективність падає.

Нанесення відбиваючих та захисних покриттів теж здійснювалося за допомогою термічного осадження у вакуумі. Як відбиваюче покриття використовувалися шари алюмінію товщиною

50–150 нм в залежності від просторової частоти та глибини модуляції ґратки. У деяких випадках для ґраток, що працюють в ІЧ-області спектра, можливе використання шару золота як відбиваючого покриття.

Для ґраток, котрі працюють у вологому чи іншому несприятливому середовищі, необхідне нанесення захисних покриттів. У рамках даного проекту розроблено технологічний процес вакуумного нанесення шарів SiO_x та SiO_2 як захисних шарів для голограмних ґраток, прозорих у робочій спектральній області і волого- та хімічностійких. Нанесення таких шарів здійснюється за допомогою термічного випаровування у вакуумі із танталових випаровувачів гранульованого SiO або ж порошку SiO_2 . При напиленні SiO внаслідок доокислення залишковими газами ми отримуємо плівку SiO_x , де $x > 1$. При цьому швидкість осадження вибирається таким чином, щоб значення x було не менше 1,5, тобто необхідно забезпечити прозорість у видимій області спектра.

ВИГОТОВЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК

З використанням розроблених та оптимізованих технологічних процесів згідно з технічними завданнями були виготовлені експериментальні зразки голограмних дифракційних ґраток з просторовими частотами 600, 1200, 1800, 3600 mm^{-1} та розмірами робочої частини 50 × 50 mm^2 . Зображення деяких експериментальних зразків показано на рис. 3.

Для дослідження форми профілю штрихів голограмних ґраток використовувався мікроскоп атомних сил Dimension 3000 Scanning Probe Microscope фірми Digital Instruments. На рис. 4 (а–г) показані отримані за допомогою мікроскопа атомних сил зображення перерізів експериментальних зразків ґраток з просторовими частотами в заданому технічному завданні інтервалі: від 600 до 3700 mm^{-1} . Зразки для досліджень готували шляхом послідовного термічного напилення у вакуумі 2×10^{-3} Па на підкладки адгезивного шару Cr та шару $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$

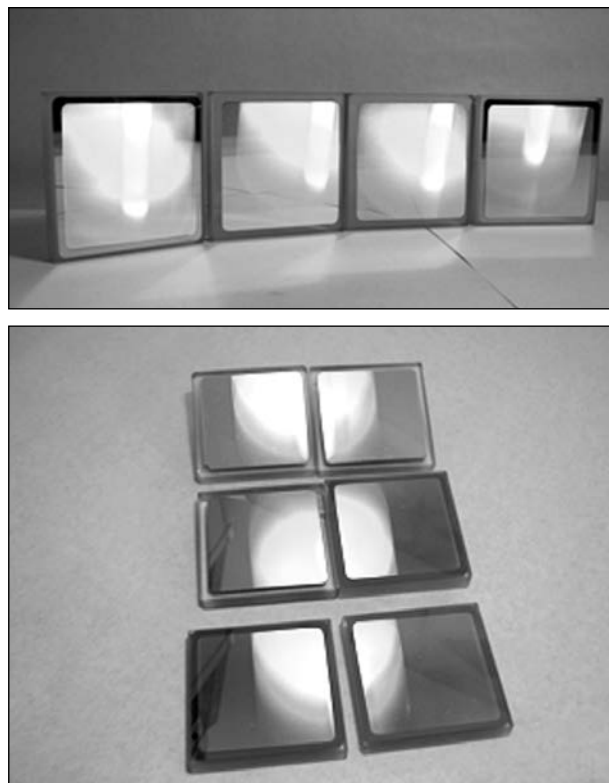


Рис. 3. Експериментальні зразки дифракційних ґраток

(а, б) і $\text{Ge}_{25}\text{Se}_{75}$ (в, г). Як підкладки використовували поліровані скляні пластини товщиною 10 мм. Товщини шарів контролювалися в процесі осадження за допомогою кварцевого вимірювача товщини (КИТ-1) і дорівнювали 30 нм для Cr та 300–800 нм (залежно від просторової частоти ґратки) для фоторезисту.

Зразки експонували періодичним світловим полем лазерного випромінювання (лазер ЛГН-503, довжина хвилі 476,5 нм) з просторовими частотами 600–3600 mm^{-1} . Після експонування здійснювали хімічну обробку селективним протравлювачем. Даний процес тривав 1,5–2 хв при температурі 22 °С. Утворені рельєфно-фазові дифракційні ґратки покривалися відбиваючим шаром Al товщиною 50–80 нм (шаром товщиною 50 нм покривався зразок з просторовою частотою 3600 mm^{-1} , всі інші — шаром 80 нм).

З рис. 4 видно, що форма профілів штрихів близька до синусоїди (чи циклоїди) залежно

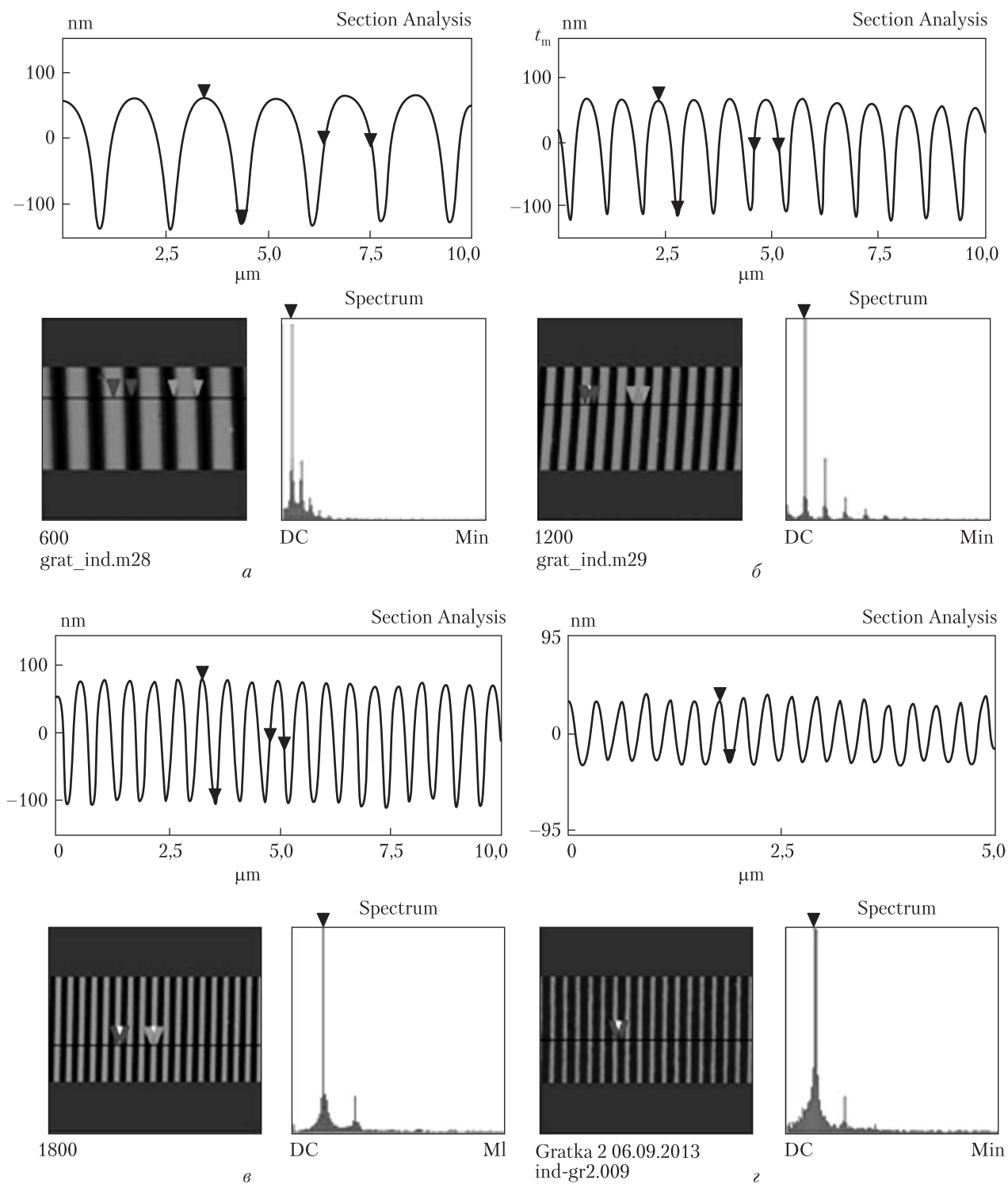


Рис. 4. АСМ-зображення форми профілю штрихів голограмних ґраток з періодами: 1667 нм (*a*), 833 нм (*б*), 555 нм (*е*), 278 нм (*z*)

від просторової частоти та режимів експонування і обробки. Глибина модуляції (тобто відношення глибини штриха до періоду ґратки) становить 0,2–0,3, що є оптимальним для одержання високих значень дифракційної ефективності та низьких значень рівня розсіяного світла.

У рамках проекту були також проведені дослідження дифракційної ефективності експериментальних зразків ґраток. Кутові $\eta(\varphi)$ (φ – кут падіння променя на ґратку при вимірюванні) та спектральні $\eta(\lambda)$ (λ – довжина хвилі променя) залежності дифракційної ефективності отриманих ґраток вимірювали для двох напрямків (p та s) поляризації падаючого світла. Спектральні вимірювання проводили для першого порядку дифракції в інтервалі 310–900 нм.

На рис. 5 показані спектри дифракційної ефективності ґраток з просторовими частотами 1200 (*a*) та 3600 мм^{-1} (*б*), сформованих на плівці $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$. Криві 1 та 2 відповідають перпендикулярному та паралельному розташуванню електричного вектора світлової хвилі відносно штрихів ґратки. Як видно з рисунка, для поляризованого світла значення дифракційної ефективності досягають 80–85 %, що свідчить про достатню глибину модуляції ґраток. У неполяризованому світлі значення становлять 40–60 % у робочій області спектра, що відповідає технічному завданню та ГСТ 3-6128-86.

Проведено також вимірювання рівня розсіяного світла експериментальних зразків голограмних дифракційних ґраток. Дослідження проводили з використанням гелій-неонового лазера ($\lambda = 632,8$ нм), в схемі також використовували гоніометр, модулятор, приймальний блок з підсилювачем. Для виготовлених зразків рівень розсіяного світла на кутовій відстані в 1° від лазерного променя складав від 2×10^{-6} до 4×10^{-6} , що відповідає технічному завданню та ДСТ 3-6128-86.

Променева міцність виготовлених голограмних ґраток була визначена шляхом вимірювання густини потужності лазерного випромінювання, при якій руйнується досліджуваний зразок (з'являються видимі сліди дії лазерного променя на поверхню ґратки). Оптична схема установки для проведення досліджень включала одномодовий твердотільний лазер з модулятором добротності, подільний клин, послаблювач, фокусуючу лінзу та вимірювач енергії ІМО-2М. Дослідження проводили на двох довжинах хвиль – 1,06 та 0,53 мкм. У результаті

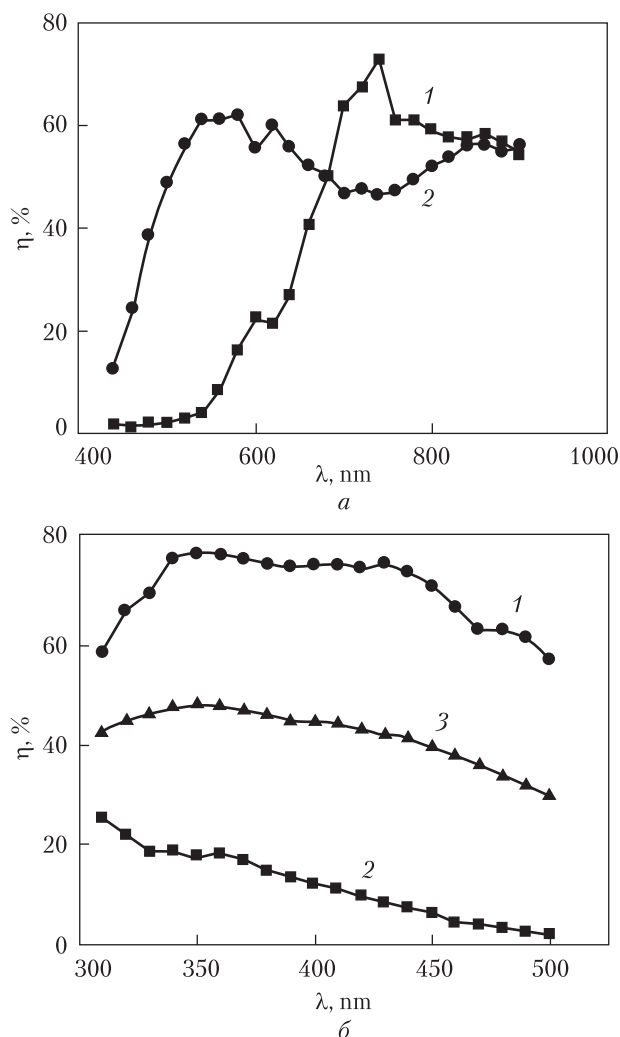


Рис. 5. Спектральний розподіл дифракційної ефективності ґраток з просторовими частотами 1200 (*a*) та 3600 мм^{-1} (*б*), сформованих на плівці $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$: криві 1 та 2 відповідають перпендикулярному та паралельному розташуванню електричного вектора світлової хвилі відносно штрихів ґратки, крива 3 – неполяризоване світло

зок (з'являються видимі сліди дії лазерного променя на поверхню ґратки). Оптична схема установки для проведення досліджень включала одномодовий твердотільний лазер з модулятором добротності, подільний клин, послаблювач, фокусуючу лінзу та вимірювач енергії ІМО-2М. Дослідження проводили на двох довжинах хвиль – 1,06 та 0,53 мкм. У результаті

проведення серії досліджень було встановлено, що променева міцність зразків знаходиться в межах 2–4 МВт/см².

Були також проведені випробування експериментальних зразків на вплив підвищеної та пониженої температури та підвищеної вологості оточуючого середовища. В результаті випробувань не спостерігалося утворення візуально помітних дефектів і не відбулося погіршення спектральних характеристик експериментальних зразків голограмних ґраток, тобто експериментальні зразки витримали проведені випробування.

ВИСНОВКИ

1. Розроблена та змонтована оптична схема для запису голограмних ґраток, яка дозволяє отримувати зразки з просторовими частотами від 600 до 3600 мм⁻¹.

2. З використанням теоретичного та числового моделювання а також результатів експериментальних досліджень були оптимізовані технологічні процеси нанесення фоторезистних халькогенідних шарів, інтерференційного експонування, селективного травлення та нанесення відбиваючих і захисних покриттів.

3. Основними перевагами розробленої технології порівняно з існуючими є те, що в ній можна використовувати фоторезисти на основі халькогенідів германію, які більш прийнятні з екологічної точки зору порівняно з традиційними халькогенідними фоторезистами на основі сполук миш'яку. Крім того, виготовлення дифракційних ґраток може здійснюватись на відпалених шарах халькогенідів, що зменшує шорсткість поверхні виробів після селективного травлення.

4. На основі результатів оптимізації розроблено технологічні інструкції по реалізації процесу виготовлення голограмних дифракційних ґраток з використанням неорганічних халькогенідних фоторезистів.

5. Виготовлено експериментальні зразки голограмних дифракційних ґраток та проведено дослідження їх характеристик, зокрема

форм профілю штрихів, спектральних та кутових залежностей дифракційної ефективності, рівня розсіяного світла та променевої міцності.

6. Встановлено, що характеристики виготовлених в рамках даного проекту експериментальних зразків голограмних дифракційних ґраток відповідають технічному завданню та ДСТ 3-6128-86.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Индутный И.З., Костышин М.Т., Касярум О.П. и др.* Фотостимулированные взаимодействия в структурах металл-полупроводник. — К.: Наук. думка, 1992. — 240 с.
2. *Vlcek M., Frumar M., Kubovy M., Nevsimalova V.* The influence of the composition of the layers and of the inorganic solvents on photoinduced dissolution of As-S amorphous thin films // *J. Non-Cryst. Solids.* — 1991. — V. 137/138. — P. 1035–1038.
3. *Пат.* 2008285 Российской Федерации, МКИ5 С 03 С 15/00, 23/00. Раствор для негативного травления халькогенидных стекол / Индутный И.З., Костюкевич С.А., Шепелявый П.Е. — Оpubл. 1994. Открытия, изобр. № 4.
4. *Indutnyi I.Z., Stronski A.V., Romanenko P.F. et al.* Manufacturing of holographic optical elements with the help of chalcogenide resists // *Proc. SPIE.* — 1994. — **2321.** — P. 352–354.
5. *Indutnyi I.Z., Stronski A.V., Kostioukevich S.A. et al.* Holographic optical element fabrication using chalcogenide layers // *Optical Engineering.* — 1995. — **34,** № 4. — P. 1030–1039.
6. *Min'ko V.I., Shepeliavyy P.E., Dan'ko V.A. et al.* Recording of high efficiency diffraction gratings by He-Ne laser // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.* — 2004. — V. 7. — № 1. — P. 88–92.
7. *Indutnyy I., Popescu M., Lőrinczi A. et al.* Shepeliavyy, Interference lithography using chalcogenide inorganic photoresist // *J. of Optoelectronics and Advanced Materials.* — 2008. — V. 10. — № 12. — P. 3188–3192.
8. *Данько В.А., Индутный И.З., Минько В.І. та ін.* Застосування двошарового халькогенідного фоторезисту для інтерференційної фотолітографії // *Оптоелектроника и полупроводниковая техника.* — 2009. — Вип. 44. — С. 68–73.
9. *Пат.* № 87393 України, МПК⁷ G03H 1/26; G03G 5/082; G03F 7/00. «Спосіб запису рельєфно-фазових періодичних структур» // *Минько В.І., Шепелявий П.Є., Индутный И.З.* — Бюл. «Промислова власність». — 10.07.2009. — № 13.

10. Данько В.А., Индутный И.З., Минько В.И., Шепелявий П.Е. Интерференционная фотолитография с использованием резистов на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников // Автометрия. — 2010. — Т. 46. — № 5. — С. 103–112.
11. Dan'ko A., Indutnyi I., Min'ko V. et al. Interference photolithography using photoetching effect in chalcogenide films // Journal of Non-Oxide Glasses. — 2012. — V. 3. — № 2. — P. 13–18.
12. Пат. України № 99226 UA, від 25.07.2012, Бюл. № 14, МПК (2012.01) G03H 1/00, G03F 7/00 G03G 5/00 / В.А. Данько, І.З. Индутний, В.І. Минько, П.Є. Шепелявий. Спосіб формування літографічних масок та рельєфно-фазових періодичних структур на шарах халькогенідних фоторезистів.
13. Индутный И.З., Минько В.И., Шепелявий П.Е. та ін. Високороздільчі фоторезисти на основі реверсивних фотореакційних змін в халькогенидних. // Тези доповідей VI Української наукової конференції з фізики напівпровідників (УКФН-6). — 23–27 вересня 2013 р. — Чернівці, Україна. — С. 498–499.
14. Туряница И.И., Пинзеник К.И., Фролова Н.П. Неорганический фоторезист на основе слоев халькогенидных стеклообразных полупроводников // В сб. «Полупроводниковые материалы и устройства на их основе для оптоэлектроники». — К.: УМК ВО, 1991. — С. 69–74.
15. Фролова Н.П., Туряница И.И. Селективное травление резистивных слоев As-Se // Матер. доп. V Укр. конф. «Фізика і технологія тонких плівок складних напівпровідників». — Ужгород, 1992. — С. 161–162.
16. Любин В.М., Седых А.М., Смирнова Н.Н., Шило В.П. Неорганические фоторезисты на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников // Микроэлектроника. — 1989. — Т. 18. № 6. — С. 523–526.
17. Зенкин С.А., Кирьянов К.В., Лобанов А.Б. и др. Механизм изменения скорости растворения пленок As_2S_3 при фотоструктурных превращениях // Матер. конф. «Некристаллические полупроводники — 89». — Ужгород, 1989. — Т. 2. — С. 186–188.

В.А. Данько, И.З. Индутный,
М.В. Луканюк, В.И. Минько, П.Е. Шепелявий

Институт физики полупроводников
им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, Киев
ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА
ГОЛОГРАММНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ
РЕШЕТОК НА ОСНОВЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ
ВАКУУМНЫХ ФОТОРЕЗИСТОВ

Выполнен инновационный проект по разработке технологического метода формирования голограммных дифракционных решеток, позволяющий изготавливать высококачественные дифракционные элементы с пространственными частотами от 600 до 3600 mm^{-1} для спектральных приборов. Разработаны технологические инструкции по реализации этого метода и изготовлены экспериментальные образцы. Установлено, что характеристики изготовленных в рамках данного проекта экспериментальных образцов голограммных дифракционных решеток соответствуют техническому заданию и ГОСТ 3-6128-86.

Ключевые слова: дифракционные решетки, халькогенидные фоторезисты, спектральные приборы.

V.A. Dan'ko, I.Z. Indutnyi,
M.V. Lykanyuk, V.I. Myn'ko, P.E. Shepeliavyi

V.Ye. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics
of the NAS of Ukraine, Kyiv

PRODUCTION TECHNOLOGY OF HOLOGRAPHIC
DIFFRACTION GRATINGS BASED ON INORGANIC
VACUUM PHOTORESISTS

An innovative project on development of the technological method for holographic diffraction gratings production which allows to produce high-quality diffractive elements with spatial frequencies from 600 to 3600 mm^{-1} for spectral instruments have been carried out. The technological instructions for the implementation of this method have been developed and experimental samples are produced. It was established that the characteristics of experimental samples of the holographic diffraction gratings produced under this project meet the specifications and the state standard 3-6128-86.

Key words: diffraction grating, chalcogenide photoresists, spectral devices.

Надійшла до редакції 04.06.14