

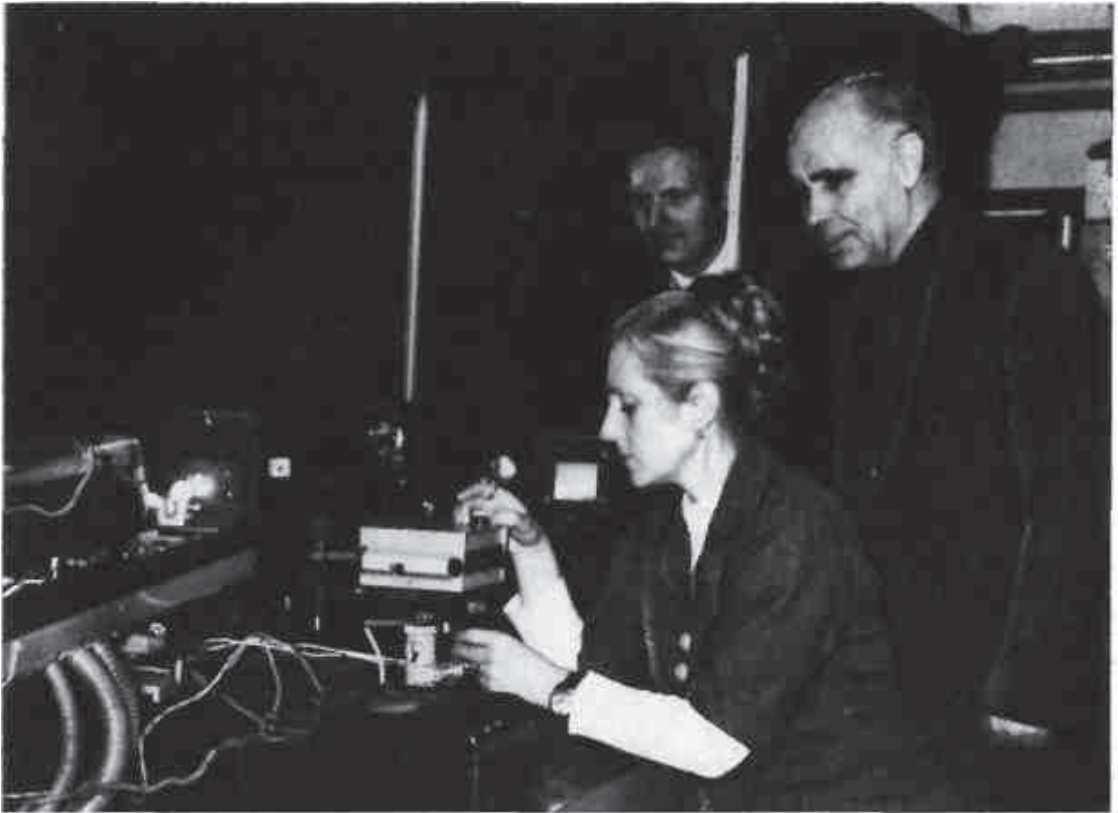
ВІДДІЛ ФОТОХІМІЧНИХ ЯВИЩ В НАПІВПРОВІДНИКАХ (№ 14)

В 1966 р., в складі Інституту напівпровідників АН УРСР був організований відділ фотохімічних явищ в напівпровідниках. До 1987 року відділ очолював канд. фіз.-мат. наук М. Т. Костишин. З 1997 по 2009 рік керівником відділу був доктор фіз.-мат. наук, професор І.З. Індутний, а з 2009 року відділ очолює канд. фіз.-мат. наук В.А. Данько. У відділі працюють 1 доктор та 6 кандидатів наук.

Основним науковим напрямком створеного відділу було дослідження фотохімічних змін в шарах напівпровідників і системах напівпровідник-метал а також стимульованої випромінюванням дифузії в тонкошарових структурах. Цей напрям сформований в результаті виявлення фотографічної чутливості тонких напівпровідникових шарів (М. Т. Костишин, К. В. Михайловська, П. Ф. Романенко, Р. А. Сандул), а також ефекту фотографічної чутливості систем, що складаються з тонких шарів напівпровідника на металевих підкладках (М. Т. Костишин, К. В. Михайловська, П. Ф. Романенко).

Проведено комплекс експериментальних досліджень виявлених ефектів, зокрема, закономірностей формування світлочутливих структур напівпровідник-метал (В. А. Данько, В. П. Завада, А. В. Коломейко, М. Т. Костишин, С. О. Костюкевич, П. Є. Шепелявий), їх оптичних характеристик (І. З. Індутний, О. П. Касярум), спектрального розподілу світлочутливості (І. З. Індутний, В. С. Костко, К. В. Михайловська, П. Ф. Романенко, О. В. Стронський), температурної залежності світлочутливості (О. О. Кудрявцев, В. І. Минько), кінетики фотостимульованих перетворень (П. Ф. Романенко, О. П. Касярум, В. І. Минько, Ю. В. Ушенін). З'ясовано вплив фотолегування металом на електричні властивості аморфних халькогенідних напівпровідників (В.А. Данько, І.З. Індутний, О.О. Кудрявцев, К. В. Михайловська, В. І. Минько), їх оптичні константи та зонну структуру (І.З. Індутний, О.О. Кудрявцев, О.П. Касярум, А.І. Стецун, М.В. Сопінський), фотоелектричні властивості (І.З. Індутний, О.О. Кудрявцев, К. В. Михайловська), локалізацію фотоактивних областей в структурі напівпровідник-метал (В.А. Данько, І.З. Індутний, О.О. Кудрявцев, О.П. Касярум, В. І. Минько). На основі виконаних експериментальних досліджень, теоретичних розрахунків та чисельного моделювання розроблена та обґрунтована модель фотостимульованої дифузії металу в шарах некристалічних халькогенідних напівпровідників (І. З. Індутний).

З'ясовано також механізм реверсивних та неревверсивних фотоструктурних



*Голографічний запис зображення здійснюється під керівництвом
канд. фіз.-мат. наук М. Т. Костишина*

перетворень в тонких шарах аморфних халькогенідних напівпровідників та галогенідів (І.З. Індутний, О.О. Кудрявцев, О.П. Касярум, К. В. Михайловська, П. Ф. Романенко, О. В. Стронський, А.І. Стецун). Виявлено ефект гігантського збільшення фотопотемніння в частинках ХСН нанометрових розмірів, коли розміри частинок співмірні з характерними розмірами середнього порядку структури ХСН (1-2 нм) та з'ясовано природу такого ефекту (І.З. Індутний, П.Є. Шепелявий).

На основі результатів досліджень механізму фотостимульованої дифузії в тонкошарових структурах ХСН-Ag і фотоструктурних перетворень у шарах ХСН, співробітниками відділу № 14 ІФН НАНУ ім. В. Є. Лашкарьова розроблені високороздільні реєструючі середовища, які характеризуються рядом унікальних параметрів, і технології їх практичного використання. Розробки захищені 65 патентами й авторськими свідоцтвами (включаючи 25 патентів зарубіжних країн).

Основні напрямки практичного використання розроблених реєструючих середовищ - неорганічний фоторезист для електронної техніки, серед-

овище для запису інформації, інтегральної оптики, оптотехніки, голографії. Розроблені неорганічні фоторезисти на основі ХСН мають найбільш високу роздільну здатність серед усіх застосовуваних у мікроелектроніці фоторезистів. Шари ХСН мають значне поглинання в ближній ультрафіолетовій і навіть у видимій області спектра, що практично виключає утворення стоячих хвиль. До переваг неорганічних халькогенідних фоторезистів можна віднести їх технологічність, оскільки халькогенідні плівки можна осаджувати у вакуумі дуже однорідними як за товщиною, так і за складом і вони можуть наноситись з використанням тих же технологічних процесів, що й функціональні шари в мікроелектроніці. Окрім цього, для цих фоторезистів властиве велике значення показника заломлення (2.3 – 3, а інколи і вище), вони прозорі в інфрачервоній (ІЧ) області спектра (від 600 нм до 12-15 мкм), характеризуються відсутністю усадок при обробках, значною механічною міцністю та хімічною стійкістю, термічною стійкістю (до 400°C).

У відділі № 14 під керівництвом П.Ф. Романенка розроблена технологія виробництва голографічних дифракційних ґраток і інших оптичних елементів на основі нових реєструючих середовищ (В.І. Минько, П.Ф. Романенко, І.Й. Робур, О.В. Стронський). Технологія забезпечує виготовлення ґраток з просторовими частотами в інтервалі 600 - 6000 мм⁻¹ на плоских, сферичних та інших підкладках. Дифракційна ефективність голограмних ґраток досягає 60 - 70% для неполяризованого випромінювання і 80 - 85% — для поляризованого. Рівень розсіяного світла - 10⁻⁶, а розміри заштрихованої частини — до 100x100 мм. Виготовлені ґратки-оригінали придатні для багаторазового копіювання. Параметри розроблених дифракційних ґраток аналогічні виробам провідних оптичних фірм: Milton Roy Company, Spectrogon, Edmund Scientific Company. Собівартість ґраток, розроблених у відділі, в 2-3 рази нижче імпорتنих аналогів.

Розроблена також технологія запису голографічних лінз Френеля і їх матриць (П.Ф. Романенко, І.Й. Робур, О.В. Стронський). Такі лінзи можна формувати як безпосередньо в шарі ХСН, так і в підкладці, використовуючи отримане на ХСН зображення як літографічну маску. Отримано високоякісні бінарні лінзи в склі і кварці за допомогою рідинного і плазмохімічного травлення.

Досить велика фотографічна широта шарів ХСН дозволяє формувати профільовані дифракційні елементи, тобто оптичні елементи з заданою формою профілю штриха. Використовуючи лазерну літографію, а також додаткові обробки симетричних ґраток на шарах ХСН і структурах ХСН-метал,

виготовляються кіноформні дифракційні лінзи, ґратки з «блиском» і ін. (І.З. Індутний, С.О. Костюкевич, П.Ф. Романенко, І.Й. Робур, О.В. Стронський, М.В. Сопінський, П.Є. Шепелявий).

Ця технологія застосовується і для формування пасивних елементів інтегральної оптики: елементів вводу-виводу випромінювання, дефлекторів, фокуруючих, розщеплюючих елементів. При цьому хвилеводом може бути і сам шар ХСН, який прозорий в ІЧ-області спектра. Якщо ж хвилеводом є підкладка, тоді шар ХСН використовується як фоторезист.

Розроблена технологія була впроваджена в Державному інституті прикладної оптики (м. Казань), виготовлені за цією технологією ґратки використовуються в спектральних приладах АО ЛОМО (Санкт-Петербург).

Світлочутливі шари ХСН широко використовуються для запису рельєфно-фазових голограм, у т.ч. райдужних голограм і інших голограмних захисних елементів (І.З. Індутний, С.О. Костюкевич, В.І. Минько, П.Ф. Романенко, І.Й. Робур, О.В. Стронський, П.Є. Шепелявий). Широкий спектр світлочутливості, фотографічна широта, висока роздільна здатність, простота обробки і відсутність усадок при обробці – усе це дозволило розробити технологію виробництва якісних оригіналів голограмних захисних елементів.

Рельєфні голограми, котрі одержують з допомогою таких неорганічних резистів, характеризуються високою дифракційною ефективністю (до 70% для одночастотних голограм), значною механічною міцністю та хімічною стійкістю, що дозволяє формувати високоякісні нікелеві матриці методом гальванопластики без додаткових технологічних обробок голограми-оригіналу. Розроблені методи введення кодуєчого фазового елемента при запису голограм, та запису прихованого зображення, що дає змогу вводити додаткову ступінь захисту цінних паперів, документів та інших об'єктів з допомогою голограмних міток. Розроблена та затверджена методика ідентифікації голограм з допомогою порівняльного аналізу хвильових полів голограми-еталона та голограми, яка досліджується.

Характеристики розроблених голограм-оригіналів аналогічні виробам зарубіжних фірм: Applied Holographic, Kurtz, Криптон та ін. Собівартість оригіналів, розроблених у відділі № 14, в 2-3 рази нижче імпортованих аналогів.

В області оптичного запису інформації розроблена технологія застосування шарів ХСН для виробництва дисків-оригіналів, а також в якості реверсивних чи неревверсивних реєструючих середовищ (І.З. Індутний, С.О. Костюкевич, П.Є. Шепелявий). Первинний запис інформації на оптичних компакт-дисках здійснюється сфокусованим променем лазера, розміри

елементів запису складають частки мікрона. Після експонування й обробки формується диск-оригінал, з якого знімаються нікелеві копії для подальшого масового тиражування. При експонуванні шару ХСН сфокусованим променем лазера спостерігаються два ефекти, стимульовані локальним нагріванням: підвищення чутливості і звуження зображення (самофокусування). Тому шари ХСН можуть використовуватися при виробництві оптичних дисків-оригіналів з підвищеною щільністю.

В якості нереверсивних реєструючих середовищ для оптичних дисків запропоновано багатокомпонентні структури $\text{GeSe}_2\text{-In-GeSe}_2\text{-Al}$ (В.А. Данько, В.І. Минько). Показано, що лазерноактивовані процеси в таких структурах відбуваються із значними величинами активаційних бар'єрів, що дозволило розробити стабільні реєструючі середовища з енергією запису, близькою до порогової. Розроблені також структури на основі осаджених у вакуумі тонких шарів As-Te-Sn чи As-Te-In з наступним відпалом для реверсивного оптичного запису з високою щільністю за допомогою короткохвильового лазера.

Розроблена також технологія рідинної та твердофазної імерсійної інтерференційної літографії для формування субмікронних напівпровідникових рельєфних структур та нанооптичних пристроїв із просторовою частотою до 8000 ліній на мм (І.З. Індутний, В.І. Минько, П.Є. Шепелявий). Використовуючи просту і дешеву імерсійну голографічну літографію, отримані періодичні оптичні наноструктури досить великої площі (75x75 мм) з критичними розмірами меншими за 150 нм. Сформовані також періодичні субмікронні структури на поверхні напівпровідників з допомогою анізотропного травлення. Розроблена технологія дозволяє виробляти субхвильові ґратки, ахроматичні поляризатори, фотонні структури, пасивні елементи інтегральної оптики та інші субмікронні і наноструктури.

Тематика відділу розширювалась і, починаючи з 90-х років, було виконано об'ємний цикл досліджень в області тонкоплівкових оптичних покриттів різноманітного функціонального призначення. Зокрема, створені градієнтні метал-діелектричні світлопоглинаючі покриття для видимої області спектра та технологія формування чорної матриці для дисплейної техніки (І.З. Індутний, К.В. Михайловська, П.Є. Шепелявий). Світлопоглинаючі (т.з. чорні) матриці широко використовуються в сучасних дисплейних приладах різних типів. У таких матричних екранах проміжки між окремими пікселями, що формують зображення, заповнені чорним (світлопоглинаючим) покриттям, яке поглинає зовнішнє світло і розсіяне випромінювання від сусідніх пікселів.

Усунення такого світлового фону сприяє підвищенню контрастності зображення і сприяє успішному функціонуванню дисплейних приладів, особливо в умовах інтенсивного освітлення (керовані літаючі апарати). Розроблене покриття ахроматичне, характеризується низьким (<1%) значенням коефіцієнта відбивання у всьому видимому діапазоні спектра, є термічно і хімічно стабільним. Покриття інертне до люмінофорів, і не впливає на яскравість їх люмінесценції. Розробка була впроваджена у виробництво на КБ «Еротрон» (м. Львів).

Розроблена також технологія вакуумного осадження композитних метал-діелектричних плівок для чутливих елементів неохолоджуваних інфрачервоних детекторів на основі мікроболометрів (І.З. Індутний, К.В. Михайловська, П.Є. Шепелявий). Такі плівки характеризуються високим (до 85%) поглинанням ІЧ-випромінювання в діапазоні 8-12 мкм та термочутливістю. Запропоновані термочутливі шари мають такі переваги: механічну та хімічну стійкість, відсутність токсичних компонент, низьку вартість, сумісність з кремнієвою технологією. Вони дозволяють спростити конструкцію пікселя за рахунок можливого поєднання в одній металодіелектричній плівці функцій поглинання ІЧ-випромінювання, термочутливості та несучої мембрани.

В останні роки у відділі проведені дослідження світловипромінюючих композитів, які містять нанокристали Si в SiO_x -матриці. Перевагою Si-SiO_x композитів, порівняно з пористим кремнієм, є їх механічна та хімічна стійкість та повна сумісність з сучасною кремнієвою технологією.

Розроблена технологія термостимульованого формування нанокластерів кремнію в тонких шарах SiO_x , та проведені дослідження характеристик таких структур. Встановлено, що розміри і концентрація нанокластерів залежать від стехіометрії вихідної SiO_x плівки, температури і тривалості відпалу. Виявлена видима фотолюмінесценція в таких шарах та показана залежність її спектрального розподілу і інтенсивності від параметрів термічної обробки (І.З. Індутний, П.Є. Шепелявий).

Показана можливість створення світловипромінюючих структур на основі нанокристалів кремнію, сформованих в поруватих SiO_x -плівках з колоноподібною структурою. Встановлено, що розмір нанокристалів та дисперсія розмірів залежить від поруватості плівки, що дає змогу контрольовано змінювати спектральний склад випромінювання (В.А. Данько, І.З. Індутний, І.Ю. Майданчук, П.Є. Шепелявий).

Вперше спостерігалася кінетика фазового розділення оксиду кремнію: зростання кількості коагульованого кремнію із збільшенням часу відпалу і

вихід на насичення. В рамках моделі дифузійно-контрольованого формування наночасток кремнію проведена оцінка величини коефіцієнта дифузії. Одержані результати підтверджують припущення про визначальну роль дифузії кисню в процесі структурно-фазових перетворень шарів SiO_x і утворення наночасток Si (В.А. Данько, І.З. Індутний, І.Ю. Майданчук, П.Є. Шепелявий).

Розроблено методи модифікації азотом або вуглецем межі нанокристалу кремнію – оксидна матриця, пасивації нанокристалів та зміни їх розмірів за допомогою хімічних та барометричних обробок, які дозволяють збільшити інтенсивність фотолюмінесценції структур на основі нанокристалів кремнію і змінювати спектральний склад випромінювання в широкому спектральному інтервалі (560 – 950 нм) (В.А. Данько, І.З. Індутний, І.Ю. Майданчук, К.В. Михайловська, П.Є. Шепелявий).

За час існування відділу було захищено 2 докторські, 15 кандидатських дисертацій, отримано більше 80 авторських свідоцтв та патентів різних країн, за наукові розробки І.З. Індутний в співавторстві отримав Державну премію України в області науки і техніки.



Др. фіз.-мат. наук І.З. Індутний та канд. фіз.-мат. наук В.І. Минько готують оптичну схему для інтерференційної лазерної літографії.