

Створені інтерференційно-абсорбційні світлофільтри на базі кристалів $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_{3x}$ та CdSb для функціонування у близькій і середній ІЧ-області. Досліджені оптичні властивості та дефекти кристалів-підкладок, їхній вплив на характеристики світлофільтра. Розроблені плівкові інтерференційні системи для різних конструкцій і робочих діапазонів. Виміряні спектральні характеристики, вивчені умови забезпечення механічної стійкості та відтворюваності параметрів світлофільтрів

Ключові слова: інтерференційний фільтр, інфрачервона область, спектральне пропускання, кристал In_4Se_3 , CdSb

Созданы интерференционно-абсорбционные фильтры на базе кристаллов $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_{3x}$ и CdSb для функционирования в ближней и средней ИК-области. Исследованы оптические свойства и дефекты кристаллов-подложек, их влияние на характеристики светофильтра. Разработаны пленочные интерференционные системы для различных конструкций и рабочих диапазонов. Измерены спектральные характеристики, изучены условия обеспечения механической прочности и воспроизводимости параметров светофильтров

Ключевые слова: интерференционный фильтр, инфракрасная область, спектральное пропускание; кристалл In_4Se_3 , CdSb

РОЗРОБКА ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНО- АБСОРБЦІЙНИХ СВІТЛОФІЛЬТРІВ НА БАЗОВИХ КРИСТАЛАХ $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_{3x}$ ТА CdSb

В. В. Стребєжев
Аспірант*

E-mail: sandmartin9@gmail.com

С. В. Нічий

Кандидат фізико-математичних наук, доцент*

E-mail: ssegg@ukr.net

І. М. Юрійчук

Кандидат фізико-математичних наук, доцент*

E-mail: ivmykyur@gmail.com

В. М. Стребєжев

Кандидат фізико-математичних наук, доцент*

E-mail: taimasi@mail.ru

*Кафедра фізики

напівпровідників і наноструктур

Чернівецький національний

університет ім. Юрія Федьковича,

вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна, 58012

1. Вступ

Для фільтрації ІЧ-випромінювання використовують конструкцію інтерференційно-абсорбційного фільтра, який складається з напівпровідникової підкладки і нанесеної на її поверхню інтерференційної системи у вигляді стопи тонких плівок з високим та низьким показниками заломлення [1]. У такому світлофільтрі багатошарове тонкоплівкове покриття формує робочу область пропускання, а фундаментальне поглинання в напівпровіднику забезпечує блокування випромінювання у фоновій області [2]. Для отримання оптичних та фоточутливих елементів, функціонуючих у близькій та середній ІЧ-області, використовують напівпровідникові кристали з відповідною шириною забороненої зони, наприклад групи $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{VI}}$ In_4Se_3 ($E_g=0,65$ eB), In_4Te_3 ($E_g=0,48$ eB) та групи $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{V}}$ CdSb ($E_g=0,48$ eB), ZnSb ($E_g=0,55$ eB) [3–5]. Застосування твердих розчинів цих кристалів $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_{3x}$ та $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Sb}$ надає додаткові можливості для регулювання положенням граничної довжини хвилі $\lambda_{\text{гр}}$, в залежності від складу, при розробці елементів оптофотоелектроніки. Відомо, що при конструюванні відрізаючих інтерференційно-абсорбційних фільтрів у випадку необхідності просування положення граничної довжини хвилі $\lambda_{\text{гр}}$ в далекохвильову

область ($\lambda_{\text{гр}} > 6$ мкм) значно зростають технологічні труднощі, які пов'язані зі збільшенням оптичної товщини та кількості шарів у плівковій системі. Ці труднощі вирішуються шляхом моделювання конструкції фільтра і підбором відповідних матеріалів плівок. При цьому плівкове покриття має бути механічно міцним, стійким до дії зовнішніх факторів та забезпечувати стабільні оптичні характеристики.

Така оптимізація плівкових систем для випадку створення світлофільтрів на кристалах In_4Se_3 та $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_{3x}$, а також на кристалах CdSb і ZnSb мало досліджена. Вимоги до адгезії всієї стопи інтерференційного покриття, до поверхні кристалів-підкладок, а також міжшарової адгезії плівок суттєво зростають, якщо потрібно нанести також металеву плівку-діафрагму, яка б задавала геометричний рисунок світлових зон фільтра. Тому актуальним є дослідження процесів і умов нанесення механічно стійких металевих плівок на досліджувані кристали групи $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{VI}}$ та $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{V}}$. Це є важливим при створенні багатоканальних світлофільтрів в технології виготовлення фотоелектричних модулів з матрицями фотоприймачів неохолоджуваного та охолоджуваного типів. На основі розробок у цих напрямках можуть бути створені ефективні оптичні світлофільтри на базових кристалах In_4Se_3 та $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_{3x}$, а також на кристалах CdSb і $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Sb}$,

які можна використовувати для обмеження короткохвильової спектральної чутливості фотоприймачів у приладах ІЧ-техніки.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Використання світлофільтрів, які здійснюють селекцію ІЧ-випромінювання в заданих спектральних інтервалах для виключення небажаних складових спектра, знайшло широке застосування в ІЧ-техніці. Серед фільтрів різноманітної будови та принципу дії для функціонування в близькій і середній ІЧ-області кращі оптичні характеристики мають інтерференційні багатошарові тонкоплівкові покриття [1, 2]. Такі світлофільтри використовуються у спектральному приладобудуванні різного призначення, в монохроматорах, спектрометрах, в інфрачервоній астрономії, в системах сигналізації. Тому проводяться інтенсивні розробки інтерференційно-абсорбційних фільтрів на базових монокристалах з різноманітних напівпровідників [6, 7]. Вибір як підкладок пластин з напівпровідникових матеріалів з заданою короткохвильовою границею пропускання допомагає зменшити число шарів інтерференційного покриття, спрощує технологію виготовлення фільтра, покращує його міцність, дозволяє ефективно подавляти короткохвильові перешкоди, довжини хвиль яких лежать в області власного поглинання напівпровідника.

Обрані в роботі як підкладки для інтерференційно-абсорбційних фільтрів базові кристали In_4Se_3 і CdSb належать до анізотропних напівпровідників ромбічної сингонії і володіють близькими значеннями ширини забороненої зони [5]. Вони представляють інтерес з точки зору практичного застосування в ІЧ-техніці як фоточутливі елементи і абсорбційні фільтри [8–10]. Зміна положення $\lambda_{\text{гр}}$ для оптичних елементів на їх основі може бути досягнута при застосуванні їхніх твердих розчинів $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_{3x}$, а також $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Sb}$ [11, 12, 5]. В той же час варто відмітити, що властивості всіх цих сполук, щодо використання їх як базових кристалів при створенні оптичних елементів ІЧ-діапазону, вивчені недостатньо. Тому актуальною є розробка інтерференційно-абсорбційних світлофільтрів на кристалах $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_{3x}$ та CdSb , яка включає конструювання і оптимізацію плівкових інтерференційних систем з різними заданими значеннями $\lambda_{\text{гр}}$.

3. Мета та задачі дослідження

Оскільки в літературі є обмежена кількість робіт з питань розробки інтерференційно-абсорбційних світлофільтрів на базі $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_{3x}$ та CdSb , метою дослідження є створення на цих кристалах ІЧ-світлофільтрів для різних робочих діапазонів, що вимагає нанесення оптимально сконструйованих тонкоплівкових систем з різних матеріалів. На величину максимального і середнього пропускання в робочій області та на коефіцієнт крутизни характеристики фільтра впливають структурні та оптичні властивості кристалів основи, однорідність, спосіб обробки поверхні [13]. Тому важливими задачами є моделювання і практична розробка багатошарових плівкових покриттів

для різних робочих діапазонів, а також встановлення технологічних умов їх нанесення на кристали In_4Se_3 , $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_{3x}$ і CdSb , при яких забезпечується механічна стійкість та відтворюваність характеристик світлофільтрів. До таких задач також відноситься вивчення впливу структури і дефектів цих базових кристалів на їх оптичні властивості і вимірювання спектральних характеристик отриманих інтерференційно-абсорбційних фільтрів в цілому [14–16].

4. Методика і результати розробки інтерференційно-абсорбційних світлофільтрів на $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_{3x}$ і CdSb

Обрані для створення оптичних елементів базові кристали та плівкові системи досліджувалися методами скануючої електронної мікроскопії (SEM), методами електроннозондового мікроаналізу і рентгеноструктурного аналізу, оптичними та електрофізичними вимірюваннями з метою встановлення їхньої придатності до формування ефективних відрізаючих світлофільтрів.

Кристали CdSb вирощувалися у графітованих кварцевих човниках методом зонної перекристалізації, з них вирізалися підкладки у площині (100) [7, 14]. Кристали In_4Se_3 , In_4Te_3 , $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_{3x}$ вирощувалися методом Чохральського з пропусканням електричного струму через межу кристал-розплав і застосуванням ефекту Пельтьє [11, 12].

При теоретичному моделюванні інтерференційно-абсорбційного фільтра враховувалося, що кристали селеніду In_4Se_3 внаслідок фундаментального поглинання здатні відрізати випромінювання до довжини хвилі $\lambda_{\text{гр}}=1,8$ мкм, а кристали In_4Te_3 і CdSb – до $\lambda_{\text{гр}}=2,5$ мкм. Розрахунок інтерференційних тонкоплівкових покриттів проводили методом еквівалентних шарів [1, 2] з урахуванням показників заломлення для In_4Se_3 $n=3,2$, для In_4Te_3 $n=3,8$ [11], та для CdSb $n=4,5$ [5]. Відповідно до цих значень n підкладки халькогенідів із зворотного боку просвітлювалися плівками SiO_2 , а підкладки CdSb – плівками ZnS . Для більш короткохвильових інтерференційних тонкоплівкових фільтрів як плівкоутворюючі матеріали були обрані Ge ($n=3,9$) та SiO_2 ($n=1,85$). Фільтри для далекої ІЧ-області розраховувалися на основі менш стандартної пари плівок Te ($n=4,5$) та SrF_2 ($n=1,35$) з високою різницею показників заломлення.

Напилення стопи з 14,26 інтерференційних плівок проводилося електронно-променевим та термічним випаровуванням, залежно від матеріалів плівок, у вакуумі $P=(1-2)\cdot 10^{-6}$ тор. Температура підкладок підтримувалася $T_{\text{п}}=450-463$ К, перед напиленням здійснювалося іонне травлення поверхні підкладок в режимі $U=0,8-1$ кВ, іонний струм $I=40$ мА, час травлення $t=6,8$ хв. Особливо важливим фактором для досягнення відповідності отриманих фільтрів і теоретично розрахованих є точність контролю товщини плівок. Вимірювання товщини плівок під час напилення здійснювалося фотометричним методом на заданій довжині хвилі, з набором фільтрів, який відповідає отриманню цілого числа фіксованих екстремумів в процесі контролю. Металізацію поверхні підкладок здійснювали тонкими плівками Al та Ag , які напилялися через маску з заданою геометрією світлових зон. Встановле-

но, що саме ці металеві плівки добре узгоджуються з напилим зверху інтерференційним фільтром з шарів Ge–SiO і з кристалами підкладок, забезпечують механічно міцну конструкцію, яка витримує охолодження до температури рідкого азоту.

Дефекти у кристалах In_4Se_3 , In_4Te_3 , $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_3$ досліджувалися в растровому електронному мікроскопі REM-100У з прискорюючою напругою $U=30$ кВ при струмі зонда $6\cdot 10^{-12}\div 3\cdot 10^{-9}$ А. Оскільки ці кристали володіють вираженою шаруватістю, підкладки з них виготовлялися шляхом сколювання по площині спайності (100). Такі підкладки відрізняються стійкістю поверхні по відношенню до хімічних реакцій, механічною міцністю, на сколах утворюється практично ідеальна поверхня, яка є придатною для формування оптичних елементів, різних гетеропереходів та елементів наноелектроніки [13]. Товщина підкладок для фільтрів складала $d=0,2\text{--}0,3$ мм.

На окремих ділянках кристалів складу $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{0,92}(\text{Te}_3)_{0,08}$ були виявлені протяжні структурні дефекти та неоднорідності у вигляді преципітатів фази In розмірами $0,2\text{--}2$ мкм (рис. 1, 2). Для зниження густини преципітатів застосовувалася стабілізація градієнта температури в області кристалізації та стабілізація величини струму 1 А/см². Протяжні дефекти, зорієнтовані в напрямку [001] є характерними для шаруватих кристалів In_4Se_3 , In_4Te_3 [4, 6, 11], їх зародження пов'язується з виділенням фази In у міжшарових проміжках і утворенням неоднорідної псевдоструктури з дальнім порядком у положенні кластерів [16].

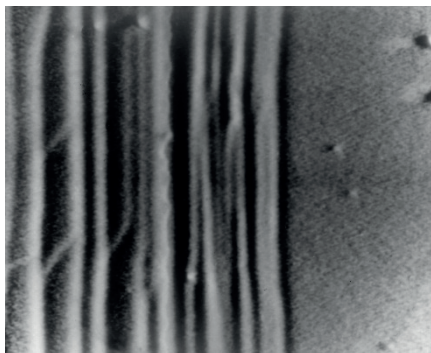


Рис. 1. SEM-зображення морфології поверхні і дефектів монокристалу $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{0,92}(\text{Te}_3)_{0,08}$

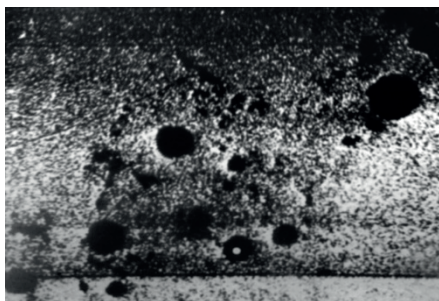


Рис. 2. SEM-зображення преципітатів фази In в кристалі $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{0,92}(\text{Te}_3)_{0,08}$

Для кристалів In_4Se_3 , вирощених вздовж напрямку [001], на рентгенівських топограмах (рис. 3), отрима-

них за методом Берга-Баррета в $\text{Cu}_K\alpha$ -випромінюванні, були зафіксовані протяжні дефекти, орієнтовані вздовж кристалографічної вісі [001]. Зменшення густини цих дефектів було отримано у кристалах In_4Se_3 та $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_3$ ($x=0,02$; $x=0,08$) з напрямком росту [010], який виявився оптимальним для виготовлення оптичних підкладок. При виготовленні підкладок були використані найбільш однорідні кристали $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_3$ з області складу $0<x<0,10$ і $0,85<x<1,00$. Для складів $0,25<x<0,70$ однорідні кристали, придатні для виготовлення світлофільтрів, не отримані [11, 12]. Спектральні характеристики пропускання кристалів підкладок $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_3$ різного складу наведені на рис. 4 (криві 1, 2).

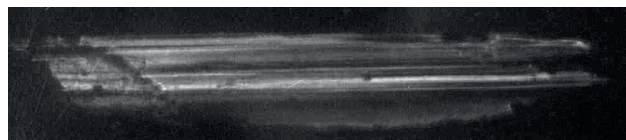


Рис. 3. Рентгенівська топограма кристалу In_4Se_3 з протяжними структурними дефектами, орієнтованими вздовж напрямку [001]

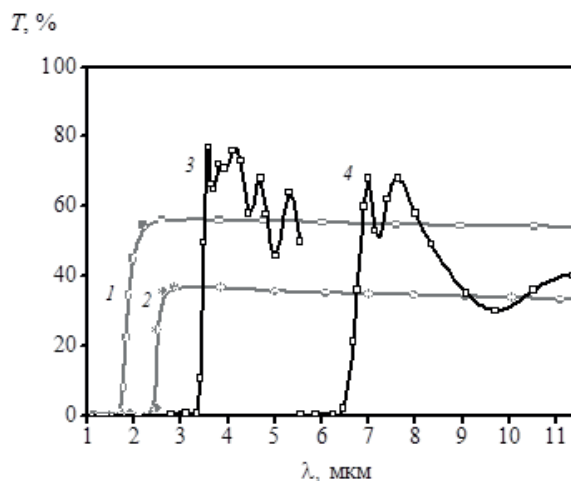


Рис. 4. Залежності при температурі 300 К коефіцієнта пропускання T (%) від довжини хвилі λ для кристалів і підкладок: 1 – $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{0,94}(\text{Te}_3)_{0,06}$; 2 – $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{0,12}(\text{Te}_3)_{0,88}$; та інтерференційно-абсорбційних фільтрів на кристалах: 3 – $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{0,94}(\text{Te}_3)_{0,06}$ ($\lambda_{\text{гр}}=3,4$ мкм); 4 – $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{0,12}(\text{Te}_3)_{0,88}$ ($\lambda_{\text{гр}}=6,5$ мкм)

Експериментально були отримані характеристики пропускання фільтрів, які наведені на рис. 4 (криві 3, 4). Для фільтрів з $\lambda_{\text{гр}}=3,4$ мкм плівкова система складається з матеріалів Ge–SiO, а для більших довжин хвиль $\lambda_{\text{гр}}=6,5$ мкм були використані плівки Te–SrF₂. У цьому випадку застосовані підкладки складу $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{0,12}(\text{Te}_3)_{0,88}$, тобто складу близького до чистого In_4Te_3 з $\lambda_{\text{гр}}=2,5$ мкм.

В якості підкладок для охолоджуваних фільтрів застосовувалися кристали іншого використаного в роботі напівпровідника – CdSb, який як і In_4Te_3 має фундаментальне поглинання в області $\lambda_{\text{гр}}=2,5$ мкм. Кристали CdSb зручні для конструювання таких оптичних елементів, оскільки мають високий показник заломлення ($n=4,5\text{--}4,8$) і особливо низьку теплопровідність $\kappa=(1,1\text{--}1,2) \cdot 10^{-2}$ Вт/см·К [5]. Для застосування як під-

кладок більш досконалих кристалів, досліджувалося питання зменшення в них густини лінійних дефектів. Дислокації в кристалах CdSb та ZnSb виявлялися методом травлення в селективному травнику за характерними ямками травлення (рис. 5).

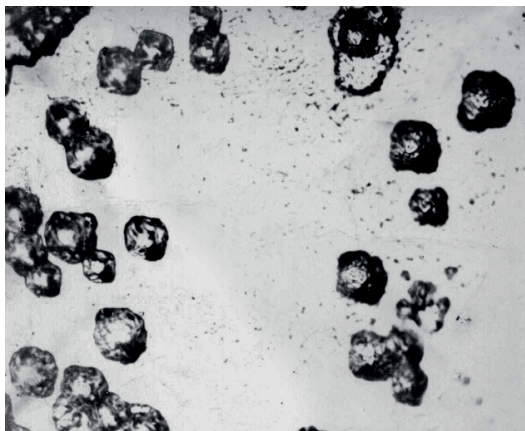


Рис. 5. Дислокаційні ямки травлення на монокристалі ZnSb

Для наплення фільтрів відбиралися кристали CdSb з густиною дислокацій $N_d < 10^4 \text{ см}^{-2}$. В окремих випадках були застосовані кристали ZnSb. Для вивчення прозорості кристалів CdSb, з яких виготовлялися підкладки для інтерференційних фільтрів, вимірювалися їх спектральні характеристики пропускання (рис. 6). Як підкладки для фільтрів були застосовані кристали CdSb [7], які володіли високою прозорістю в діапазоні 2,5–25 мкм з коефіцієнтом пропускання $T \sim 39\%$, який мало змінювався при охолодженні від кімнатної температури до 87 К (рис. 6, крива 1, крива 3). Прозорість кристалів ZnSb була дещо нижчою (рис. 6, крива 2).

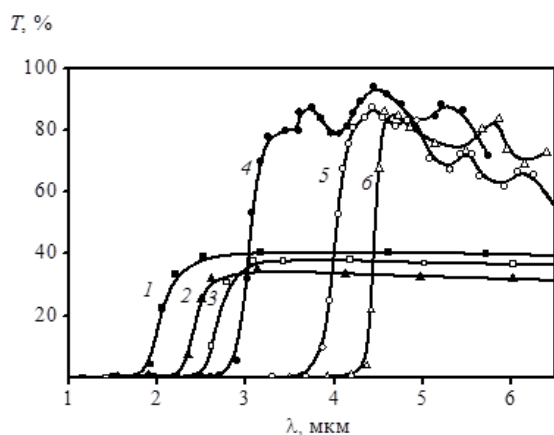


Рис. 6. Залежності коефіцієнта пропускання T (%) від довжини хвилі λ для кристалів підкладок: 1 – CdSb ($T=87$ К); 2 – ZnSb ($T=300$ К); 3 – CdSb ($T=300$ К); та інтерференційно-абсорбційних фільтрів при $T=300$ К на кристалах: 4 – CdSb ($\lambda_{гр}=2,9$ мкм); 5 – ZnSb ($\lambda_{гр}=3,8$ мкм); 6 – CdSb ($\lambda_{гр}=4,3$ мкм)

Спектральні характеристики абсорбційно-інтерференційних фільтрів з плівок Ge, SiO, ZnS на кристалах CdSb та ZnSb з положенням $\lambda_{гр}=2,9; 3,8; 4,3$ мкм

наведені на рис. 6, криві 4–6. Для охолоджуваних до 87 К фільтрів було враховано температурне зміщення краю власного поглинання CdSb (рис. 6, крива 1), тому для забезпечення відповідного інтервалу високовідбиваючих дзеркал інтерференційна система була сконструйована з двох підсистем із загальним числом шарів 24–26 (рис. 6, крива 6).

Важливо те, що випробовування шляхом термоциклювання в інтервалі температур 77–398 К показали механічну міцність пліткових покриттів та малу зміну спектральних характеристик при охолодженні. Оптимальні отримані фільтри характеризуються такими параметрами: крутизна границі відрізання $k=0,9\text{--}0,96$, середнє пропускання в робочій області $T_{сер}=80\text{--}82\%$, максимальне пропускання $T_{max}=90\text{--}93\%$.

5. Обговорення результатів

При розробці нових відрізаючих фільтрів на базових кристалах $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_x$ і CdSb як інтерференційні складові були сконструйовані системи з 14,26 плівок з матеріалів Ge–SiO та Te–SrF₂. Кількість плівок та різниця їх показників заломлення підбиралися такими, щоби забезпечити перекриття областей фундаментального поглинання кристалів-підкладок з інтервалом високовідбиваючих дзеркал інтерференційного мультишару. Велика різниця показників заломлення плівок Te–SrF₂ забезпечує широкий інтервал високовідбиваючих дзеркал, необхідний для зміщення $\lambda_{гр}$ в далекохвильову область.

При дослідженні оптичних властивостей кристалів-підкладок для фільтрів було встановлено, що прозорість кристалів In_4Se_3 , $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_x$ залежить від умов їх вирощування і значною мірою від орієнтації затравки, яка задає напрямок росту. Отримано, що коефіцієнт пропускання кристалів суттєво знижується у випадку наявності в них значної кількості протяжних структурних дефектів, а також преципітатів In. Зменшення густини дефектів, які впливають на параметри фільтрів, було отримано у кристалах $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_x$ з напрямком росту [010], який є оптимальним для виготовлення оптичних підкладок.

Глибоке подавлення сонячних та інших випромінювальних перешкод в області фону $\lambda < 2,5$ мкм можна здійснити, використовуючи як підкладки для відрізаючих фільтрів монокристали CdSb або ZnSb, які мають край власного поглинання біля довжин хвиль $\lambda=2,5$ мкм. Особливо мала теплопровідність кристалів-підкладок з CdSb надає переваги саме цьому матеріалу при конструюванні фільтрів, розташованих перед охолоджуваними ІЧ-фотоприймачами, оскільки дозволяє утримувати на них низьку температуру. В цьому випадку температурне зміщення краю власного поглинання при охолодженні підкладки CdSb до 87–77 К потребує збільшення числа шарів плівкової системи до 24–26 для забезпечення відповідного інтервалу блокування фонових випромінювань.

Виміряні спектральні характеристики і параметри розроблених інтерференційно-абсорбційних фільтрів відповідають вимогам відповідних стандартів, що надає їм перспективи використання у промислових виробках ІЧ-техніки.

6. Висновки

Нанесенням інтерференційних систем плівок Ge–SiO₂ на підкладки з In₄Se₃, In₄(Se₃)_{0,94}(Te₃)_{0,06} і CdSb, та плівок Te–SrF₂ на підкладки з In₄(Se₃)_{0,12}(Te₃)_{0,88}, одержані ІЧ-фільтри з різним положенням короткохвильової межі відрізання $\lambda_{\text{гр}}=2,9; 3,4; 3,8; 4,3; 6,5$ мкм. Виміряні спектральні характеристики пропускання кристалів-підкладок та виготовлених світлофільтрів різної конструкції. Оптимальні виготовлені світлофільтри характеризуються високими параметрами: крутизна границі відрізання $k \geq 0,9$, середнє пропускання $T_{\text{сер}} \geq 80\%$, максимальне пропускання $T_{\text{max}} \geq 90\%$, що робить їх перспективними

для практичного використання. Оптимальні умови для виготовлення механічно- та криєстійких фільтрів забезпечуються використанням досконалих базових кристалів-підкладок, іонним очищенням їх поверхні, напиленням покриттів з підібраних матеріалів плівок Ge–SiO₂ та Te–SrF₂.

Зменшення густини дефектів, які впливають на параметри фільтрів, було отримано у кристалах In₄(Se₃)_{1-x}Te_{3x} з напрямком росту [010], який є оптимальним для виготовлення оптичних підкладок. На кристалах CdSb з густиною дислокацій $N_d < 10^4 \text{ см}^{-2}$ отримані інтерференційно-абсорбційні фільтри, які витримують термоцикування в інтервалі температур 77–398 К.

Література

1. Thelen, A. Design of Optical Interference Coatings [Text] / A. Thelen. – New York: McGraw-Hill, 1989. – 255 p.
2. Беляева, А. И. Криогенные многослойные покрытия [Текст] / А. И. Беляева, В. А. Сиренко. – К.: Наукова думка, 1991. – 276 с.
3. Xingfu, L. Anisotropic optical and thermoelectric properties of In₄Se₃ and In₄Te₃ [Text] / L. Xingfu, X. Bin, Y. Gongqi, L. Xue, Y. Lin // Journal of applied physics. – 2013. – Vol. 113, Issue 20. – P. 203502. doi: 10.1063/1.4807312
4. Losovyj, Ya. B. The anisotropic band structure of layered In₄Se₃ (001) [Text] / Ya. B. Losovyj, L. Makinistian, E. A. Albanesi, A. G. Petukhov, Jing Liu, P. Galiy, O. R. Dveriy, P. A. Dowben // Journal of applied physics. – 2008. – Vol. 104, Issue 8. – P. 083713-1-083713-7. doi: 10.1063/1.3000453
5. Лазарев, В. Б. Полупроводниковые соединения группы АІІВ [Текст] / В. Б. Лазарев, В. Я. Шевченко, Я. Х. Гринберг, В. В. Соболев. – М.: Наука, 1978. – 256 с.
6. Грицюк, Б. Н. Твердый раствор In₄(Se₃)_{1-x}Te_{3x} – материал для абсорбционных оптических фильтров [Текст] / Б. Н. Грицюк, Т. С. Мошкова, А. Д. Огородник, И. М. Паренко, Т. А. Волянская // Журнал прикладной спектроскопии. – 1999. – Т. 66, № 4. – С. 577–579.
7. Dremluzhenko, S. G. Interference IR-filters on the CdSb monocrystal substrates [Text] / S. G. Dremluzhenko, L. I. Konopaltseva, S. M. Kulikovskaya, Yu. P. Stetsko, V. N. Strebezhev, A. I. Rarenko, S. E. Ostapov // Proc. of SPIE. – 1999. – Vol. 3890. – P. 104–110.
8. Makinistian, L. Ab initio calculations and ellipsometry measurements of the optical properties of the layered semiconductor In₄Se₃ [Text] / L. Makinistian, E. A. Albanesi, N. V. Gonzalez Lemus, A. G. Petukhov, D. Schmidt, E. Schubert, Ya. B. Losovyj, P. Galiy, P. A. Dowben // Physical Review B. – 2010. – Vol. 81, Issue 7. – P. 075217-1–075217-8. doi: 10.1103/physrevb.81.075217
9. Benramdane, N. Structural and optical properties of In₄Se₃ thin films obtained by flash evaporation [Text] / N. Benramdane, R. H. Misho // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 1995. – Vol. 37, Issue 3-4. – P. 367–377. doi: 10.1016/0927-0248(95)00031-3
10. Melnychuk, T. A. Laser synthesis of thin films and layers of In₄Se₃, In₄Te₃ and modification of their structure [Text] / T. A. Melnychuk, V. N. Strebegeev, G. I. Vorobets // Applied Surface Science. – 2007. – Vol. 254, Issue 4. – P. 1002–1005. doi: 10.1016/j.apsusc.2007.09.054
11. Гертович, Т. С. Электрические и оптические свойства твердых растворов In₄(Se₃)_{1-x}Te_{3x} (0,60 < x < 1,00) [Текст] / Т. С. Гертович, С. И. Гринева, А. Д. Огородник, О. Т. Столярчук, К. Д. Товстюк, Е. С. Шарлай // Украинский физический журнал. – 1985. – Т. 30, № 4. – С. 624–628.
12. Мошкова, Т. С. Вплив легування на оптичні та фотоелектричні властивості монокристалів In₄(Se₃)_{1-x}Te_{3x} [Текст] / Т. С. Мошкова, Т. А. Мельничук, А. Д. Огородник, В. М. Стребежев // Украинский физический журнал. – 2005. – Т. 50, № 12. – С. 1254–1258.
13. Балицкий, А. А. Особенности топологии поверхности слоистых кристаллов In₄Se₃ [Текст] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2006. – № 2 (62). – С. 63–64.
14. Обедзинський, Ю. К. Фоточутливі гетероструктури і фільтри інфрачервоного діапазону на монокристалах CdSb, In₄Se₃ [Текст] / Ю. К. Обедзинський, Б. М. Грицюк, В. В. Стребежев, В. М. Стребежев, І. М. Юрійчук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – Т. 6, № 12(60). – С. 44–46. – Режим доступу: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/6029/5408>
15. Стребежев, В. В. Властивості оптичних і фотоелектричних елементів на основі In₄Se₃, In₄(Se₃)_{1-x}Te_{3x} [Текст] / В. В. Стребежев, В. М. Стребежев, С. В. Нічий, І. М. Юрійчук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – Т. 6, № 12 (66), ч. 2. – С. 113–116. – Режим доступу: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/19736/17584>
16. Гарамус, В. М. Исследование структуры дефектов в кристаллах In₄Se₃ методом малоуглового рассеяния нейтронов [Текст] / В. М. Гарамус, Я. П. Пилат, В. П. Савчин, А. Х. Исламов // Физика твердого тела. – 1998. – Т. 40, № 2. – С. 248–250.