

УДК 621.315 : 535.215

ФОТОЧУТЛИВІ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ І ФІЛЬТРИ ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ НА МОНОКРИСТАЛАХ Cd Sb, In₄Se₃

Отримані фоточутливі гетероструктурні елементи і інтерференційно-абсорбційні відрізаючі фільтри на основі напівпровідникових монокристалів CdSb та In₄Se₃. Проведена модифікація лазером епітаксійних шарів та вивчена їх морфологія і структура. Показано, що оптимальні інтенсивності лазерної обробки призводять до покращення структури перехідного шару і забезпечують формування різких гетеропереходів, фоточутливих в ІЧ-області спектру

Ключові слова: напівпровідник, монокристал, гетероструктура, інфрачервоний фільтр, CdSb, In₄Se₃

Получены фоточувствительные гетероструктурные элементы и интерференционно-абсорбционные отрезающие фильтры на основе полупроводниковых монокристаллов CdSb и In₄Se₃. Проведена модификация эпитаксиальных слоев лазером и изучена их морфология и структура. Показано, что оптимальные интенсивности лазерной обработки приводят к улучшению структуры переходного слоя и обеспечивают формирование резких гетеропереходов, фоточувствительных в ИК-области спектра

Ключевые слова: полупроводник, монокристалл, гетероструктура, инфракрасный фильтр, CdSb, In₄Se₃

Ю.К. Обедзинський
Завідувач лабораторією*

Б.М. Грицюк
Кандидат фізико-математичних наук, доцент*

В.В. Стребжев
Аспірант*

В.М. Стребжев
Кандидат фізико-математичних наук, доцент*

І.М. Юрійчук
Кандидат фізико-математичних наук, доцент*
*Кафедра фізики напівпровідників і наноструктур
Чернівецький національний університет
ім. Ю. Федьковича
вул. Коцюбинського 2, м. Чернівці, Україна, 58012
Контактний тел.: (03722) 4-75-25
E-mail: microel@chnu.edu.ua

1. Вступ

В даний час є потреба в фотоприймачах та оптичних фільтрах інфрачервоного діапазону для застосувань в ІЧ-техніці та в телекомунікаційних системах з оптоволоконним зв'язком. Монокристали сполук CdSb та In₄Se₃ мають ширину забороненої зони відповідно 0,48 eV і 0,65 eV, що визначає їхню фоточутливість і оптичні властивості в близькій та середній інфрачервоній області спектру [1,2]. Створення епітаксійних гетеропереходів на CdSb і In₄Se₃ дає можливість використовувати їх в якості фоточутливих елементів, з іншого боку ці монокристали володіють високою прозорістю в ІЧ-області, що робить перспективним створення на їх основі відрізаючих та смугових оптичних фільтрів [3-5]. Можливість сумісного використання в одному фотоприймальному пристрої цих фільтруючих та фоточутливих елементів робить актуальним їх розробку, вивчення структури і властивостей.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Для створення епітаксійних структур p-n переходи в CdSb були отримані лазерною перекристалізацією

приповерхневого шару монокристалу, при цьому вольт-ватна чутливість гетероструктур на CdSb складала 2,6·10⁴ В/Вт в діапазоні λ=2-2,6 мкм, що дозволило авторам запропонувати їх як фотоприймачі для близької ІЧ-області [1]. Недоліком цих гетероструктур є дефекти у вигляді глибоких кратерів та тріщин на поверхні шарів, нестабільність структурних модифікацій в рекристалізованому шарі.

В роботі [2] з метою створення гетеропереходу на монокристалічну пластину In₄Se₃ наносили методом молекулярно-пучкової епітаксії плівку з GaSe. Однак навіть після наступного відпалу, який використовували для стабілізації структури, в плівці GaSe зафіксовані утворення областей іншої фази Ga₂Se₃ та виділення наноострівців металічного індію. В той же час метод рідиннофазної епітаксії дозволяє виготовляти стабільні за характеристиками прилади. Тому в даній роботі була поставлена задача виготовити рідиннофазною епітаксією гетероепітаксійні структури на основі шарів CdSb і In₄Se₃ та дослідити їх фоточутливість.

В [5] отримані ІЧ-фільтри на CdSb. Для створення фільтрів також на монокристалах In₄Se₃ з різним положенням меж відрізання, в роботі проведені дослідження інтерференційних багатшарових покриттів на підкладках з цих напівпровідників.

3. Експериментальні дослідження і результати

Гетероструктури CdSb–Cd_{1-x}Zn_xSb та In₄Te₃–In₄Te₃ були одержані методом рідиннофазної епітаксії [3]. Вирощування епітаксійних шарів проводилося в системах Cd–Sb–Bi, а також In–Te–Bi. Для виготовлення епітаксійних гомо- і гетероструктур на основі CdSb як підкладки використовувалися вирізані в кристалографічній площині (001) оптично поліровані пластини CdSb та Cd_{1-x}Zn_xSb (x=0,1–0,3) товщиною (0,8–1) мм, кристали для яких вирощувалися методом зонної плавки. Як підкладки для нанесення шарів р-In₄Te₃ використовувалися сколоті в площині (100) шайби з монокристалів п-In₄Se₃, вирощених методом Чохральського, з концентрацією носіїв 4·10¹⁴ см⁻³, електропровідністю 4·10⁻³ ом⁻¹·см⁻¹. Товщини епітаксійних шарів складала 12–30 мкм.

Для покращення структури епітаксійних шарів і плівок застосовувалася лазерна обробка [4]. Структура і склад отриманих епітаксійних шарів CdSb та In₄Te₃ до і після опромінення лазером, вивчалися в електронному растровому мікроскопі РЕМ-100У, при прискорюючій напрузі 15 і 30 кВ, струмі електронного зонда (5·10⁻¹²–2·10⁻⁹) А.

Для лазерного випромінювання з енергією E=2–5 Дж/см² на епітаксійні шари CdSb характеризувалася зміною блочної східчастої морфології поверхні, типової для рідинної епітаксії, на більш планарну, монокристалічну (рис. 1а). Така планарна морфологія, як відомо, є кращою для формування приладних структур з промислово придатними характеристиками. Шари In₄Te₃ після лазерної обробки аналогічно набували вигляду моноблоків, які мають правильну кристалографічну форму і впорядковану планарну структуру (рис. 1б).



Рис. 1. Епітаксійні шари після лазерної обробки: а) поверхня шару CdSb; б) поверхня шару In₄Te₃; в) поперечний скол гетероструктури шар In₄Te₃ (1) – підкладка In₄Se₃ (2)

Конфігурація і розміри локальних мікрообластей розподілу потенціалу в області гетеромережі вивчалися в РЕМ методом потенціального контрасту на поперечних сколах гетероструктур, при прикладанні напруги в прямому та в зворотному напрямках. Було встановлено, що лазерна обробка епітаксійних гетероструктур CdSb–Cd_{1-x}Zn_xSb, в інтервалі енергій 2,4–3 Дж/см², веде до вирівнювання положення електричної і металургійної границі гетероперехода і відповідно до покращення електрофізичних параметрів (рис. 1в). Для обох груп епітаксійних гетероструктур на сполуках A^{II}B^V та на A^{III}B^{VI} встановлено зменшення, під впливом лазерної обробки, ширини перехідних областей епішар-підкладка до величини 0,4 – 0,6 мкм.

Спектральний розподіл фото е.р.с. для гетероструктур шар n-CdSb на підкладці твердого розчину

Cd_{0,87}Zn_{0,13}Sb характеризувався максимумом fotocутливості в області 2,5 мкм.

Цій довжині хвилі відповідає енергія 0,49 еВ, що можна пов'язати з фотогенерацією носіїв в підкладці. При зміні складу підкладки з монокристалу твердого розчину Cd_{1-x}Zn_xSb від x=0,13 до x=0,3 відбувається зміна положення як довгохвильового, так і короткохвильового краю кривої fotocутливості. Для складу x=0,3 крива має вигляд плато з двома максимумами при 2,15 і 2,6 мкм (рис. 2, крива 1).

Фоточутливі елементи, виготовлені на основі отриманих гетеропереходів з використанням шарів In₄Te₃ та In₄Se₃, чутливі до ГЧ-випромінювання в спектральному діапазоні 1,0–2,5 мкм при кімнатній температурі (рис. 2, крива 2). Для таких гетеропереходів при охолодженні до T=213К, отримано значення вольтової чутливості S_{λm}=1,5·10⁴ В/Вт і виявної здатності D*_{λm}=8,6·10¹⁰ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹. Відповідно для гетеропереходів на CdSb D*_{λm}=2,2·10⁹ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹ при 180 К.

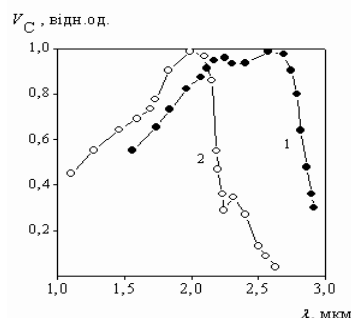


Рис. 2. Спектральні характеристики fotocутливості гетероструктур CdSb–Cd_{0,7}Zn_{0,3}Sb (крива 1) та In₄Te₃–In₄Se₃ (крива 2)

В сукупності спектральні характеристики fotocутливості для гетероструктур CdSb–Cd_{1-x}Zn_xSb та In₄Te₃–In₄Se₃ охоплюють весь діапазон довжин хвиль близької ГЧ-області. На них спостерігаються типові для гетеропереходів два максимума,

що відповідають фотогенерації носіїв у вузькозонному та широкозонному матеріалі.

Параметри отриманих гетероепітаксійних структур є достатньо високими, тому можна зробити висновки про перспективність виготовлення fotocутливих елементів для фотоприймальних пристроїв на їх основі.

Методом еквівалентних шарів були розраховані багатошарові тонкоплівкові інтерференційні покриття для наповнення відповідних плівкових систем (плівки з Ge, ZnS, SiO), на пластини з монокристалів CdSb [5] та In₄Se₃ з метою одержання інтерференційно-абсорбційних відрізаючих фільтрів. Контроль товщини плівок, в процесі вакуумного наповнення, здійснювався фотометричним методом контролю при фіксованій довжині хвилі. Одержані відрізаючі фільтри на

монокристалів CdSb, з границею відрізання в області $\lambda_{\text{гр}}=2,5\div 3,9$ мкм, а також на монокристалів In_4Se_3 , з $\lambda_{\text{гр}}=1,8\div 3,3$ мкм (рис. 3, крива 1, крива 2).

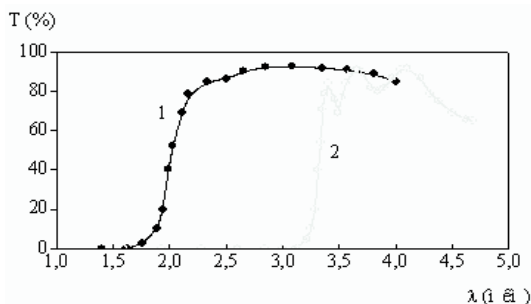


Рис. 3. Спектральні характеристики коефіцієнта пропускання відрізаючих фільтрів на In_4Se_3

Фільтри володіють високим коефіцієнтом пропускання в робочій області $T_{\text{max}}=(85-95)\%$ і крутизною границі відрізання до $K=0,96$. Порівнюючи спектральні характеристики пропускання фільтрів з характеристиками фоточутливості для гетероструктур, можна зробити висновок про можливість їх сумісного використання в приладах у відповідних комбінаціях, наприклад, фільтр на основі In_4Se_3 з $\lambda_{\text{гр}}=1,8$ мкм встановлювати перед фотоприймачем на основі гетеропереходу

$\text{CdSb}-\text{Cd}_{0,7}\text{Zn}_{0,3}\text{Sb}$ для відрізання короткохвильових перешкод, викликаних дією Сонця та інших джерел випромінювання. Перспективні також багатоканальні світлофільтри на основі комбінацій фільтрів на монокристалів CdSb та In_4Se_3 з різною границею відрізання, які можуть встановлюватися перед відповідною матрицею фотоприймачів.

4. Висновки

Одержання методом рідинної епітаксії гетероструктур на основі сполук CdSb та In_4Se_3 дає можливість виготовити фоточутливі елементи з досконалою морфологією поверхні та структурою гетеромежі. Реальну структуру гетеропереходів $\text{CdSb}-\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Sb}$ та $\text{In}_4\text{Te}_3-\text{In}_4\text{Se}_3$ можна покращувати дією імпульсного лазерного випромінювання, з оптимальною енергією $2,4-3$ Дж/см², при цьому досягається оптимізація параметрів і характеристик їхньої фоточутливості. Отримані фоточутливі гетероструктурні елементи, та інтерференційно-абсорбційні відрізаючі фільтри, на основі напівпровідникових монокристалів CdSb і In_4Se_3 перспективні для конструювання фотоприймальних приладів типу фільтр – фотоприймач, придатних для селекції та реєстрації хвиль з близької ІЧ-області спектра.

Література

1. Пляцко, Г.В. Формирование p-n-переходов в антимониде кадмия под действием лазерного излучения [Текст] / Г.В. Пляцко, С.Г. Кияк С.Г., А.Ф. Семизоров, М.И. Мойса // Физика и техника полупроводников. – 1980. – В. 2. – С.404-406.
2. Балицький, О.О. Взаємодія GaSe при молекулярно пучковій епітаксії з підкладкою In_4Se_3 [Текст] / О.О. Балицький // Журнал фізичних досліджень. – 2005. – т.9, №6. – С.265-267.
3. Gritsyuk, V.M. IR-photodetectors on CdSb, In_4Se_3 , In_4Te_3 -epitaxial barrier structures [Текст] / O.V. Galochkin, A.I. Rarenko, V.N. Strebezhev // Proceedings of the SPIE. – 2003. – V. 5065. – P. 139-145.
4. Melnychuk T.A, Strebegev V.N. Vorobets G.I. Laser synthesis of thin films and layers of In_4Se_3 , In_4Te_3 and modification of their structure [Текст] / T.A. Melnychuk V.N., Strebegev, G.I. Vorobets // Applied Surface Science. – 2007. – V.254. – P.1002.
5. Dremluzhenko, S.G. Interference IR-filters on the CdSb monocrystal substrates [Текст] / S.G. Dremluzhenko, L.I. Konopaltseva, S.M. Kulikovskaya, Yu.P. Stetsko, V.N. Strebezhev, A.I. Rarenko, S.E. Ostapov // Proceedings of the SPIE. – 1999. – V. 3890. – P.104-110.

Abstract

Photosensitive $\text{CdSb}-\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Sb}$ and $\text{In}_4\text{Se}_3-\text{In}_4\text{Te}_3$ heterostructure elements and interference absorptive cutting filters based on CdSb and In_4Se_3 semiconductor single crystals have been obtained by biquid-phase epitaxy and vacuum deposition. Laser modification of epitaxial layers has been carried out and layers morphology and structure are investigated. It is shown that the optimal intensity of laser treatment leads to improving of transition layer structure and gives sharp heterojunctions which are photosensitive in the infrared wavelengths region. These heterojunctions exhibit significant photosensitivity at room temperature. Spectral photosensitivity characteristics of $\text{CdSb}-\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Sb}$ and $\text{In}_4\text{Se}_3-\text{In}_4\text{Te}_3$ heterostructures covers entire infrared wavelengths region. Interference absorptive cutting filters on CdSb single crystals with cutting limit $\lambda_{\text{cut}} = 2,5 \div 3,9$ μm , as well as on In_4Se_3 single crystals with $\lambda_{\text{cut}} = 1,8 \div 3,3$ μm have been obtained. Spectral characteristics and parameters of the filters and photosensitive elements are studied. Electron microscope investigations and microanalysis of their structure have been carried out. Practical applications of photosensitive elements in optoelectronic devices are proposed

Keywords: semiconductor; single crystal; heterostructure; infrared filter; CdSb; In_4Se_3