

ВПЛИВ АКТИВНИХ ОБРОБОК НА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУР НА ОСНОВІ ПЛІВОК CdTe

М.І. КЛЮЙ,¹ В.П. КОСТИЛЬОВ,¹ А.М. ЛУК'ЯНОВ,¹ А.В. МАКАРОВ,¹
В.В. ЧЕРНЕНКО,¹ Г.С. ХРИПУНОВ,² Н.М. ХАРЧЕНКО,² А.В. МЕРІУЦ,²
Т.М. ШЕЛЕСТ,² Т.А. ЛІ,² А.М. КЛЮЙ³

¹Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
(Просп. Науки, 41, Київ 03028; e-mail: klyui@isp.kiev.ua)

²Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"
(Вул. Фрунзе, 21, Харків 61002)

³Київський національний університет ім. Тараса Шевченка
(Вул. Володимирська, 64, Київ 01601)

УДК 541.183
©2012

Досліджено фотоелектричні характеристики структур ІТО/CdTe, виготовлених методом термічного вакуумного випаровування та шляхом осадження у квазізамкненому об'ємі до та після різних обробок. Частина зразків проходила "хлоридну" обробку, інша – відпал на повітрі. Після цього проводилась обробка зразків у плазмі водню та нанесення на них тонкої алмазоподібної плівки. Показано, що проведення "хлоридної" обробки структур ІТО/CdTe приводить до збільшення дифузійної довжини носіїв заряду у шарі CdTe. Проведення термовідпалу не впливає на значення дифузійної довжини носіїв заряду у шарі CdTe, але значно підвищує fotocутливість, що свідчить про зменшення на поверхні шару CdTe швидкості поверхневої рекомбінації. Шляхом комбінації термовідпалу, "хлоридної" обробки, плазмової обробки у водні та нанесення тонких алмазоподібних плівок отримано збільшення довжини дифузії носіїв заряду у шарі CdTe в усіх досліджуваних структурах ІТО/CdTe. На структурах ІТО/CdTe, отриманих термічним вакуумним випаровуванням, обробка у плазмі водню привела до значного збільшення спектральної чутливості в діапазоні довжин хвиль 400–800 нм, а на структурах, які пройшли "хлоридну" обробку, значне збільшення спектральної чутливості досягалось після обробки у плазмі водню нанесення алмазоподібних плівок.

1. Вступ

Одним з альтернативних джерел енергії є пряме перетворення сонячної енергії в електричну шляхом використання сонячних елементів (СЕ) на основі fotocутливих напівпровідникових структур. Проте, вартість отриманої фотоелектричним методом електроенергії ще залишається високою, тому актуальною є задача її зменшення. Зниження вартості електричної енергії, отриманої з використанням напівпровідникових СЕ, досягається різними шляхами, зокрема, зменшенням вартості використаного при виготовлен-

ні СЕ напівпровідникового матеріалу. Тому нині значна увага приділяється дослідженням, спрямованим на удосконалення конструкції і технології виготовлення тонкоплівкових СЕ, серед яких перспективними є гнучкі СЕ на основі дешевих у виготовленні плівок CdTe [1–5], а кращі зразки таких СЕ на скляних підкладках нині мають ефективність понад 16,5%.

Для підвищення ефективності процесів фотоелектричного перетворення енергії в СЕ на основі CdTe при їх виготовленні застосовують різні активні обробки. Зокрема, відпал в атмосфері хлору приводить до рекристалізації плівок CdTe з появою зерен з невеликим розкидом розмірів і збільшення інтенсивності фотолюмінесценції з піком поблизу 1,4 eV, що відповідає ширині забороненої зони CdTe [6]. Плазмова обробка іонами аргону шару CdTe перед нанесенням на нього тилового контакту приводить до збільшення струму короткого замикання отриманих зразків СЕ [7].

Проте вплив різних активних обробок на характеристики fotocутливих структур на основі плівок телуриду кадмію поки що досліджений недостатньо. Тому метою даної роботи було проведення порівняльних досліджень впливу таких активних обробок, як відпал на повітрі, "хлоридна" обробка, плазмова обробка у водні і нанесення алмазоподібних вуглецевих плівок (АВП) на фотоелектричні характеристики структур на основі плівок CdTe, які були осаджені у різних умовах.

2. Зразки і методика досліджень

У роботі було досліджено дві партії зразків, які являли собою структури ІТО/CdTe, сформовані на опти-

чному склі марки К8 і відрізнялись технологією формування базового шару – плівки CdTe. Оксид олова та індію (ІТО) наносили на скло методом нереактивного магнетронного розпилення. Шар ІТО мав товщину $d = 0,5$ мкм, пропускання у видимому діапазоні спектра 86% та поверхневий опір 150 Ом/квадрат. На шар оксиду ІТО наносили шар телуриду кадмію. У першій партії зразків шар CdTe виготовлено методом термічного вакуумного випаровування, у другій – шляхом осадження у квазізамкненому об'ємі.

Для отримання методом термічного вакуумного випаровування стехіометричних базових шарів CdTe температура осадження не повинна перевищувати 350 °С, що дозволяє застосовувати як підкладки сучасні прозорі поліімідні плівки, які витримують нагрів до $T = 450$ °С. Крім того, метод термічного вакуумного випаровування дозволяє реалізувати високоефективний промисловий спосіб подачі гнучкої підкладки у зону конденсації – “рулонну” технологію.

Перевагою технології отримання плівок CdTe шляхом осадження у квазізамкненому об'ємі є можливість реалізувати умови росту, близькі до термодинамічно рівноважних, цьому сприяє невелика різниця між температурою випаровувача і температурою підкладки. Величини температур осадження, які при реалізації цієї технології не перевищують 400 °С, також дозволяють використовувати поліімідні плівки у ролі підкладки.

У роботі осадження плівок CdTe методом термічного випаровування здійснювалось у вакуумній установці типу УВН при початковому рівні вакууму 1×10^{-4} Па. Випаровування плівок телуриду кадмію здійснювалось з графітового випаровувача довжиною 10 см та шириною 1 см, що дозволяє отримувати однорідні структури розміром до $10 \cdot 10$ см². При осадженні плівок CdTe температура підкладки становила 320–330 °С, випаровувача – 690–700 °С.

Плівки CdTe, сформовані шляхом осадження у квазізамкненому об'ємі, були отримані при температурі осадження 380 °С та температурі випаровувача 490 °С.

В обох методах отримання плівки CdTe час осадження становив 10 хвилин, а товщина сформованої плівки – 4–5 мкм.

Всі зразки кожної із двох партій після цього були поділені на три групи. Перша група не проходила ніяких обробок, друга проходила “хлоридну” обробку, третя – просто відпал на повітрі у таких же умовах, як і зразки другої групи.

“Хлоридна” обробка у технології виробництва СЕ на основі телуриду кадмію застосовується для полі-

пшення кристалічної та енергетичної структури шару CdTe. У роботі на поверхню шарів CdTe зразків другої групи обох партій у вакуумній установці при початковому рівні вакууму $2 \cdot 10^{-3}$ Па методом термічного випаровування без нагріву підкладки наносили плівки CdCl₂. Потім отримані багатошарові плівкові системи відпалювали на повітрі у закритому об'ємі при температурі 430 °С протягом 25 хв. Для видалення продуктів реакції відпалені зразки були піддані протравлюванню в 5%-ному розчині бром у метанолі.

Для відокремлення впливу міжфазної взаємодії хлориду та телуриду кадмію від термічного відпалу на повітрі в роботі було проведено дослідження плівки CdTe після відпалу на повітрі в такому ж режимі, що і при “хлоридній” обробці (температура відпалу 430 °С, час – 25 хв), який був реалізований на зразках третьої групи обох партій.

Після цього всі зразки проходили обробку у плазмі водню, а потім приблизно половину площі експериментальних зразків, покритих шаром CdTe, закривали маскою, а на іншу їх половину наносили плівки аморфного гідрогенізованого вуглецю a-C:H:N.

Обробку у плазмі водню проводили за кімнатної температури при потужності розряду плазми 175 Вт та тиску водню 25 Па протягом 1 хв. АВП наносили методом плазмохімічного осадження (PE-CVD – plasma-enhanced chemical vapor deposition) з плазми ВЧ-розряду (13,56 МГц) при потужності 175 Вт. При цьому використовували суміш газів із співвідношенням $H_2:N_2:CH_4:Ar = 2:9:5:1$, тиск газу в камері дорівнював 100 Па, а час осадження становив 25 с. Осадження проводили при кімнатній температурі підкладки, для чого нижній електрод реактора, на який поміщали зразки, охолоджували водою. Нанесені АВП мали товщину 0,7 нм.

На експериментальних зразках на різних етапах їх виготовлення і проведення обробок досліджували спектральні залежності конденсаторної фото-ерс у діапазоні довжин хвиль 400–1200 нм, які вимірювали у режимі автоматичної підтримки сталого рівня енергетичної освітленості. При цьому використовували слюдяний напівпрозорий електрод, який механічно притискали до поверхні зразка. Виміри спектральних залежностей проводили на установці для визначення відносних спектральних характеристик фотоперетворювачів в атестованому органами Держспоживстандарту України Центрі випробувань фотоперетворювачів та батарей фотоелектричних Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України.

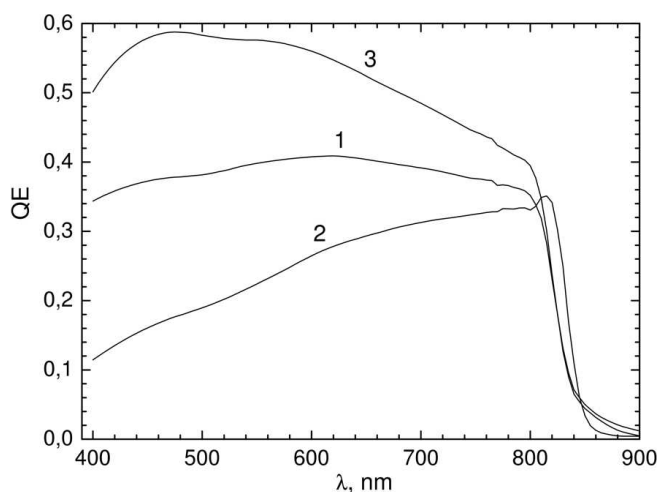


Рис. 1. Спектральні залежності сигналу конденсаторної фото-ерс (відносні одиниці), нормовані на сталу кількість квантів світлового потоку, які отримані на структурах ITO/CdTe: 1 – без додаткових обробок; 2 – після “хлоридної” обробки; 3 – після відпалу на повітрі при $T = 430\text{ }^{\circ}\text{C}$

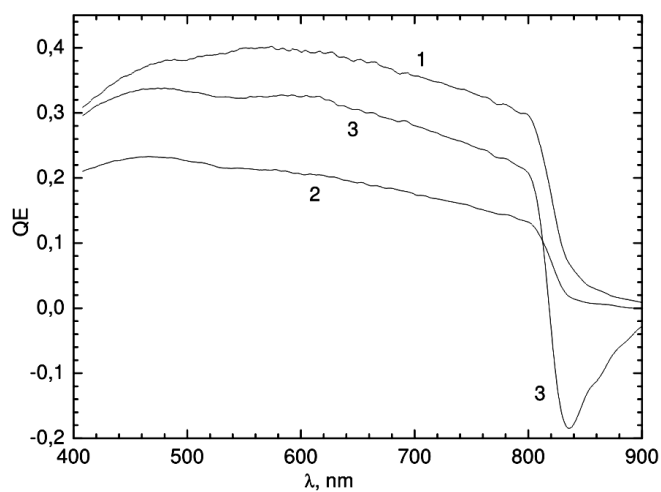


Рис. 2. Спектральні залежності сигналу конденсаторної фото-ерс (відносні одиниці), нормовані на сталу кількість квантів світлового потоку, які отримані для структури ITO/CdTe, сформованій в умовах квазізамкненого об'єму: 1 – початкова спектральна залежність; 2 – після водневої обробки; 3 – після водневої обробки і нанесення АВП

3. Експериментальні результати та їх обговорення

Результати дослідження спектральних залежностей конденсаторної фото-ерс, сформованих на склі структур ITO/CdTe, в яких шар телуриду кадмію осаджено у квазізамкненому об'ємі, до та після проведення різних активних обробок, наведено на рис. 1.

Як видно з рис. 1, спектральна залежність, отримана для структури ITO/CdTe після проведення “хлоридної” обробки (крива 2), має різкий спад у більш довгохвильовій області спектра порівняно зі спектральною залежністю для структури ITO/CdTe без обробок (крива 1), що вказує на збільшення дифузійної довжини носіїв заряду у шарі CdTe, і є позитивним результатом. Але після проведення зазначеної обробки суттєво зменшується короткохвильова спектральна чутливість, що свідчить про збільшення на відкритій поверхні шару CdTe швидкості поверхневої рекомбінації внаслідок збільшення концентрації рекомбінаційно-активних центрів. Збільшення дифузійної довжини носіїв заряду у шарі CdTe при “хлоридній” обробці зумовлене поліпшенням кристалічної та енергетичної структури шару CdTe [6].

Спектральна залежність, отримана для структури ITO/CdTe після проведення термовідпалу на повітрі (рис. 1, крива 3), має різкий спад у довгохвильовій області спектра, де і спектральна залежність для структури ITO/CdTe без обробок, що вказує на відсутність впливу цього термовідпалу на величину

дифузійної довжини носіїв заряду у шарі CdTe. Але на відміну від результатів, отриманих після “хлоридної” обробки, структура ITO/CdTe після проведення термовідпалу на повітрі має більш високу чутливість у спектральному діапазоні від 400 нм до початку області різкого спаду спектральної характеристики (820 нм) у порівнянні зі структурою ITO/CdTe без обробок (крива 1), що свідчить про зменшення на відкритій поверхні шару CdTe швидкості поверхневої рекомбінації внаслідок зменшення концентрації рекомбінаційно-активних центрів.

Зміна концентрації рекомбінаційно-активних центрів на відкритій поверхні шару телуриду кадмію після проведених обробок викликана зміною кількості обірваних зв'язків на цій поверхні, що, швидше за все, зумовлено зміною стехіометрії приповерхневої області шару CdTe. Як відомо, протравлювання у розчині бром-метанолу, яке застосовується після проведення “хлоридної” обробки для видалення з поверхні продуктів хімічної реакції, переважно витравлює кадмій, формуючи на поверхні нанорозмірний прошарок телуру [8]. У технології СЕ це використовується для спрощення формування тунельного тильного контакту до базового шару телуриду кадмію [9].

Результати дослідження спектральних залежностей конденсаторної фото-ерс, сформованих на склі структур ITO/CdTe до та після обробки у плазмі водню та подальшого нанесення АВП, наведено на рис. 2–7, причому результати, наведені на рис. 2–

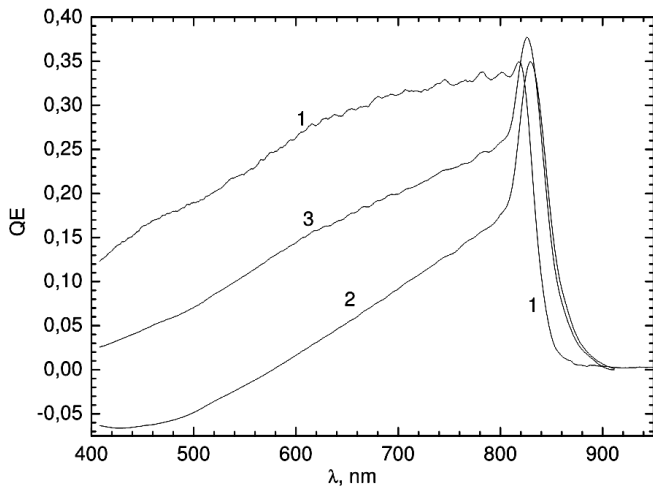


Рис. 3. Те саме, що і на рис. 2, але отримані для структури ITO/CdTe після проведеної раніше "хлоридної" обробки

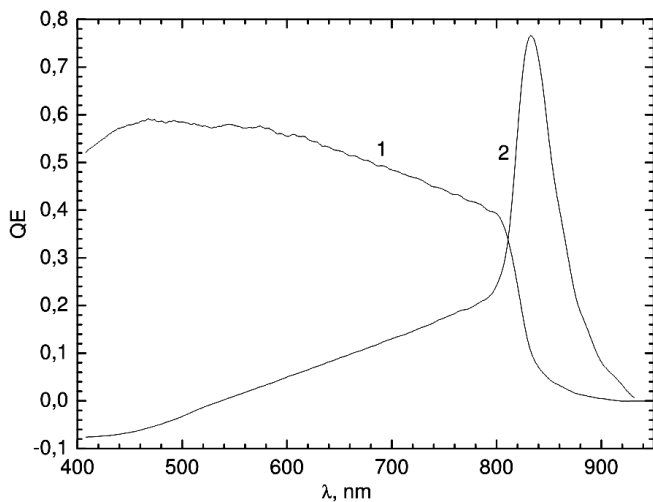


Рис. 4. Спектральні залежності сигналу конденсаторної фото-ерс (відносні одиниці), нормовані на сталу кількість квантів світлового потоку, які отримані для структури ITO/CdTe після проведеного раніше термовідпалу на повітрі при $T = 430\text{ }^{\circ}\text{C}$: 1 – початкова спектральна залежність; 2 – після водневої обробки і нанесення АВП-покриття

4, отримано на зразках, виготовлених шляхом осадження у квазізамкненому об'ємі, а на рис. 5–7 – на зразках, виготовлених методом термічного вакуумного випаровування.

З отриманих результатів, наведених на рис. 2, видно, що після водневої обробки (крива 2) спектральна чутливість зменшується порівняно з початковою (крива 1) практично у всьому дослідженому діапазоні. Наступне нанесення АВП (крива 3) підвищує спектральну чутливість, але початковий рівень чутли-

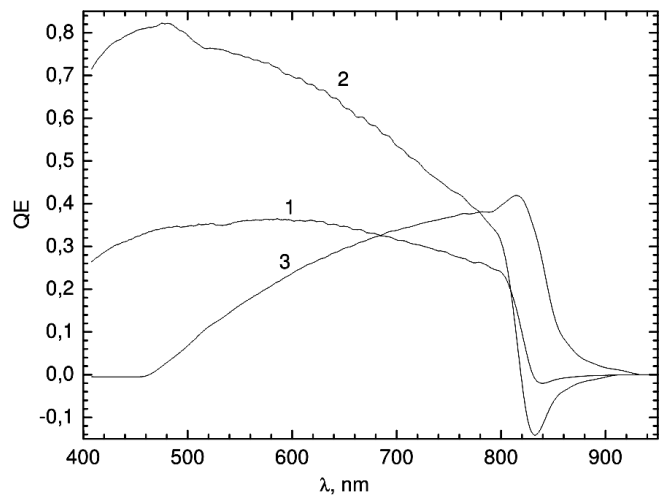


Рис. 5. Спектральні залежності сигналу конденсаторної фото-ерс (відносні одиниці), нормовані на сталу кількість квантів світлового потоку, які отримані для структури ITO/CdTe, сформованої термічним вакуумним випаровуванням: 1 – початкова спектральна залежність; 2 – після водневої обробки; 3 – після водневої обробки і нанесення DLC-покриття

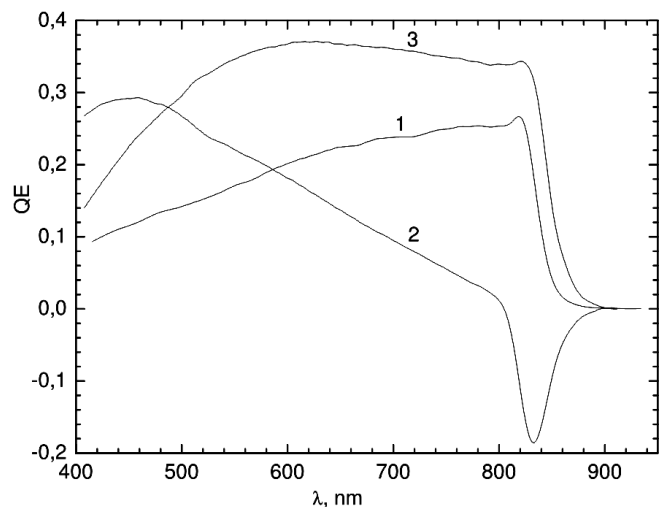


Рис. 6. Те саме, що і на рис. 5, але отримані для структури ITO/CdTe після проведеної раніше "хлоридної" обробки

вості (крива 1) не досягається. Крім того, після нанесення АВП сигнал конденсаторної фото-ерс змінює знак на негативний у довгохвильовій області спектра.

На рис. 3 наведено спектральні залежності конденсаторної фото-ерс, отримані для структури ITO/CdTe, яка попередньо пройшла описану вище "хлоридну" обробку. Як видно з рис. 3, і у цьому випадку воднева обробка приводить до зменшення спектральної чутливості практично у всьому дослідженому діапазоні. Наступне нанесення АВП підви-

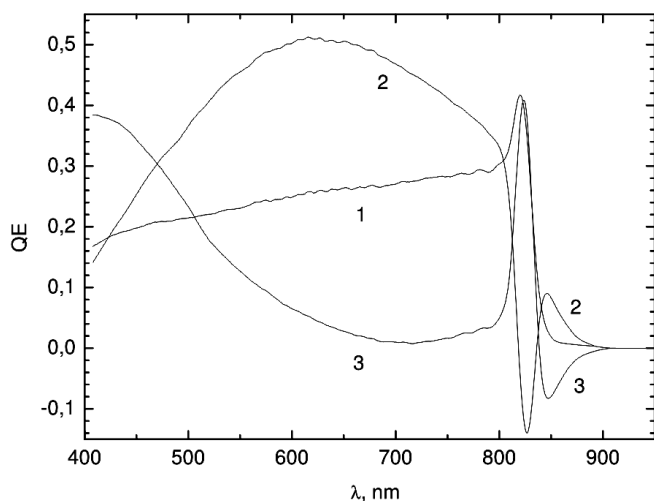


Рис. 7. Те саме, що і на рис. 5, але отримані на структурі ІТО/СdТе після проведеного раніше термовідпалу на повітрі при $T = 430\text{ }^{\circ}\text{C}$

ще спектральну чутливість, але початковий рівень чутливості (крива 1), як і у попередньому випадку (рис. 2), не досягається. Крім того, після проведення водневої обробки сигнал конденсаторної фото-ерс змінює знак на негативний у короткохвильовій області спектра. З рис. 3 видно, що спектральна залежність, отримана для структури ІТО/СdТе, після водневої обробки (крива 2) має різкий спад у більш довгохвильовій області спектра порівняно із початковою (крива 1), причому цей результат зберігається і після нанесення АВП.

На рис. 4 наведено спектральні залежності конденсаторної фото-ерс, отримані для структури ІТО/СdТе, яка попередньо пройшла описаний вище термовідпал на повітрі. У цьому випадку після водневої обробки і нанесення АВП спостерігаються такі зміни спектральної залежності: значне зменшення спектральної чутливості у діапазоні довжин хвиль до 800 нм, зсув різкого спаду спектральної характеристики в більш довгохвильову область та зміна знака сигналу конденсаторної фото-ерс на негативний у короткохвильовій області спектра.

На рис. 5 наведено спектральні залежності конденсаторної фото-ерс, отримані для виготовленої методом термічного вакуумного випаровування структури ІТО/СdТе до та після проведення водневої обробки і наступного нанесення шару АВП. З наведених на рис. 5 результатів видно, що воднева обробка приводить до значного збільшення спектральної чутливості практично у всьому дослідженому діапазоні. Наступне нанесення АВП зменшує спектральну чутли-

вість і приводить до зміщення довгохвильового спаду спектральної залежності в область більших довжин хвиль. Крім того, сигнал конденсаторної фото-ерс змінює знак на негативний у довгохвильовій області спектра.

На рис. 6 наведено спектральні залежності конденсаторної фото-ерс, отримані для структури ІТО/СdТе, яка попередньо пройшла описану вище хлоридну обробку з наступним термовідпалом.

Як видно з рис. 6, проведена воднева обробка підвищує короткохвильову спектральну чутливість, але при цьому сигнал конденсаторної фото-ерс змінює знак на негативний у довгохвильовій області спектра. Наступне нанесення АВП значно змінює ситуацію. Порівняно зі спектральною залежністю до проведення обробок (крива 1) спектральна залежність після водневої обробки і нанесення АВП (крива 3) характеризується більш високою фоточутливістю у всьому дослідженому спектральному діапазоні, відсутністю зміни знака конденсаторної фото-ерс, зміщенням різкого спаду спектральної характеристики в область більших довжин хвиль.

На рис. 7 подано спектральні залежності конденсаторної фото-ерс, отримані для структури ІТО/СdТе, яка попередньо пройшла операцію термовідпалу на повітрі при $T = 430\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Як видно з рис. 7, у цьому випадку воднева обробка приводить до підвищення спектральної чутливості, але спостерігається значний спад чутливості у короткохвильовій області. Крім того, після проведення обробок сигнал конденсаторної фото-ерс змінює знак на негативний у довгохвильовій області спектра.

Аналіз отриманих результатів, які подано на рис. 2–7, дозволив встановити такі особливості. Зміна знака сигналу конденсаторної фото-ерс на негативний, яка спостерігалась у багатьох випадках, вказує на те, що після проведення певних активних обробок чи їх комбінацій у досліджених структурах виникав бар'єр, який після виготовлення на основі цих структур СЕ буде електрично включений назустріч робочому $p - n$ -переходу і тому буде негативно впливати на величину фотоструму, зменшуючи його, а значить і ефективність цих СЕ. При цьому зміна знака сигналу конденсаторної фото-ерс, яка наявна як у короткохвильовій, так і у довгохвильовій частині спектральної характеристики, вказує на те, що цей бар'єр може виникати і біля відкритої, і біля закритої оксидом ІТО поверхонь шару СdТе. Інші зміни спектральної чутливості досліджених зразків під впливом проведених активних обробок пов'язані зі зміною на відкритій поверхні шару СdТе концентрації рекомбінаційно-

активних центрів, що приводить до зміни швидкості поверхневої рекомбінації, та зі зменшенням об'ємних рекомбінаційних втрат, що приводить до збільшення дифузійної довжини носіїв заряду у шарі CdTe (на це вказує зміщення різкого спаду низки спектральних залежностей у більш довгохвильову область спектра). Зміни концентрації рекомбінаційно-активних центрів на відкритій поверхні шару CdTe зумовлені зміною кількості обірваних зв'язків на ній внаслідок зміни стехіометрії приповерхневої області шару телуриду кадмію, а зменшення об'ємних рекомбінаційних втрат після певних активних обробок відбувається внаслідок поліпшення кристалічної та енергетичної структури шару CdTe.

Порівняння експериментальних результатів дослідження впливу активних обробок на спектральні залежності конденсаторної фото-ерс структур ІТО/CdTe, сформованих в умовах квазізамкненого об'єму, показало, що проведена у роботі воднева обробка зразків, які попередньо не піддавались ніякій обробці або пройшли "хлоридну" обробку, знижувала спектральну чутливість практично у всьому дослідженому діапазоні довжин хвиль, яка дещо підвищувалась після нанесення АВП, але не досягала початкового рівня (до проведення плазмової обробки), рис. 2, 3. Водночас, на структурах ІТО/CdTe, які попередньо пройшли або "хлоридну" обробку, або термовідпал на повітрі (рис. 3, 4), проведення водневої обробки і нанесення АВП приводило до збільшення дифузійної довжини носіїв заряду у шарі CdTe.

Експериментальні результати, отримані на структурах ІТО/CdTe, сформованих методом термічного вакуумного випаровування, показали, що проведена воднева обробка зразків, які попередньо не піддавались ніякій обробці або пройшли термовідпал на повітрі (рис. 5, 7), підвищувала спектральну чутливість практично у всьому дослідженому діапазоні довжин хвиль, а наступне нанесення АВП приводило до зниження спектральної чутливості. Крім того, для структури ІТО/CdTe, яка не проходила попередньої обробки (рис. 5), проведення водневої обробки і нанесення АВП приводило до збільшення дифузійної довжини носіїв заряду у шарі CdTe. Для структури ІТО/CdTe, яка попередньо пройшла "хлоридну" обробку (рис. 6), воднева обробка і нанесення АВП приводили до суттєвого підвищення спектральної чутливості в усьому дослідженому діапазоні довжин хвиль.

Причиною отримання різних результатів на експериментальних зразках ІТО/CdTe, сформованих шляхом осадження у квазізамкненому об'ємі та методом

термічного вакуумного випаровування, при проведенні водневої обробки і наступному нанесенні АВП є структурні відмінності шарів телуриду кадмію, отриманих у різних умовах. Як свідчать результати наших попередніх досліджень, шари, отримані шляхом осадження у квазізамкненому об'ємі до і після проведення "хлоридної" обробки, характеризуються суттєво більшою якістю кристалічної структури: більшим розміром зерен, меншою концентрацією дефектів кристалічної структури, нижчим рівнем мікротамакронапружень у порівнянні з базовими шарами, отриманими термічним вакуумним випаровуванням [10–12]. Таким чином, отримані результати свідчать про те, що при умові оптимізації режимів проведення водневих обробок гетеросистем ІТО/CdTe і наступного нанесення АВП для базових шарів телуриду кадмію з різною якістю кристалічної структури можливо досягти покращення їх рекомбінаційних характеристик.

4. Висновки

Встановлено, що проведення "хлоридної" обробки структури ІТО/CdTe приводить до збільшення дифузійної довжини носіїв заряду у шарі CdTe. Проведення лише термовідпалу на повітрі при температурі 430 °С не впливає на значення дифузійної довжини носіїв заряду у шарі CdTe, але значно підвищує фоточутливість у спектральному діапазоні від 400 нм до початку області різкого спаду спектральної характеристики (820 нм), що свідчить про зменшення на поверхні шару CdTe швидкості поверхневої рекомбінації.

Показано, що певними комбінаціями таких активних обробок, як термовідпал на повітрі, "хлоридна" обробка, обробка у плазмі водню та нанесення тонких алмазоподібних вуглецевих плівок можна збільшити довжину дифузії носіїв заряду у шарі телуриду кадмію у структурах ІТО/CdTe, отриманих як методом термічного вакуумного випаровування, так і шляхом осадження у квазізамкненому об'ємі.

Встановлено, що на отриманих термічним вакуумним випаровуванням структурах ІТО/CdTe, які зовсім не піддавали додатковим обробкам або проходили операцію термовідпалу на повітрі, обробка у плазмі водню значно збільшує спектральну чутливість у діапазоні довжин хвиль 400–800 нм, а на структурах, які пройшли "хлоридну" обробку, значне збільшення спектральної чутливості у зазначеному діапазоні досягається після проведення обробки у плазмі водню та нанесення алмазоподібних плівок.

1. F.P.J.M. Kerkhof and J.A. Moulijn, *J. Phys. Chem.* **83**, 1612 (1979).
2. G. Khrypunov, A. Romeo, F. Kurdesau, D.L. Bätzner, H. Zogg, and A.N. Tiwari, *Solar Energy Mater. Solar Cells* **90**, 664 (2006).
3. X. Mathew, J.P. Enriquez, A. Romeo, and A.N. Tiwari, *Solar Energy* **77**, 831 (2004).
4. J. Perrenoud, S. Buecheler, and A.N. Tiwari, in *Proceedings of the 34-th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2009*, p. 695.
5. A. Romeo, G. Khrypunov, F. Kurdesau, M. Arnold, D.L. Bätzner, H. Zogg, and A.N. Tiwari, *Solar Energy Mater. Solar Cells* **90**, 3407 (2006).
6. A.N. Tiwari, G. Khrypunov, F. Kurdesau, D.L. Bätzner, A. Romeo, and H. Zogg, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* **12**, 33 (2004).
7. A. Romeo, S. Buecheler, M. Giarola, G. Mariotto, A.N. Tiwari, N. Romeo, A. Bosio, and S. Mazzamuto, *Thin Solid Films* **517**, 2132 (2009).
8. M. Hädrich, C. Kraft, C. Löffler, H. Metzner, U. Reislöhner, and W. Witthuhn, *Thin Solid Films* **517**, 2282 (2009).
9. B.E. McCandless and R.W. Birkmire, *Solar Cells* **31**, 527 (1991).
10. S.S. Hegedus, and B.E. McCandless, *Solar Energy Mater. Solar Cells* **88**, 75 (2005).
11. Б.Т. Бойко, Г.С. Хрипунов, Н.М. Харченко, Н.А. Ковтун, *Материалы V международной конференции "Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении", Воронеж, Россия, 2004*, Т. 1, С. 97.
12. Г.С. Хрипунов, *Физика и техника полупроводников* **39**, 1266 (2005).
13. Б.Т. Бойко, Н.М. Харченко, Г.С. Хрипунов, *Матеріали X міжнародної конференції з фізики і технології тонких плівок (МКФТГП- X). Івано-Франківськ, Україна, 2005*, Т. 1, С. 170.

Одержано 02.09.11

ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ ОБРАБОТОК
НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУР
НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК CdTe

Н.И. Клюй, В.П. Костыльов, А.Н. Лукьянов, А.В. Макаров,
В.В. Черненко, Г.С. Хрипунов, Н.М. Харченко, А.В. Меруци,
Т. М. Шелест, Т.А. Ли, А.Н. Клюй

Резюме

Исследованы фотоэлектрические характеристики структур ITO/CdTe, изготовленных методом термического вакуумного испарения и путем осаждения в квазизамкнутом объеме до

и после разных обработок. Часть образцов проходила "хлоридную" обработку, другая – отжиг на воздухе. После этого проводилась обработка образцов в плазме водорода и нанесение на них тонкой алмазоподобной пленки. Показано, что проведение "хлоридной" обработки структур ITO/CdTe приводит к увеличению диффузионной длины носителей заряда в слое CdTe. Проведение термоотжига не влияет на значение диффузионной длины носителей заряда в слое CdTe, но значительно повышает фоточувствительность, которая свидетельствует об уменьшении на поверхности слоя CdTe скорости поверхностной рекомбинации. Путем комбинации термоотжига, "хлоридной" обработки, плазменной обработки в водороде и нанесения тонкой алмазоподобной пленки получено увеличение длины диффузии носителей заряда в слое CdTe во всех исследуемых структурах ITO/CdTe. На структурах ITO/CdTe, полученных термическим вакуумным испарением, обработка в плазме водорода приводила к значительному увеличению спектральной чувствительности в диапазоне длин волн 400–800 нм, а на структурах, которые прошли "хлоридную" обработку, значительное увеличение спектральной чувствительности достигалось после обработки в плазме водорода и нанесения алмазоподобных пленок.

EFFECT OF ACTIVE TREATMENTS ON PHOTOVOLTAIC
CHARACTERISTICS OF STRUCTURES BASED
ON CdTe FILMS

N.I. Klyui¹, V.P. Kostylyov¹, A.N. Lukyanov¹, A.V. Makarov¹,
V.V. Chernenko¹, G.S. Khripunov², N.M. Kharchenko²,
A.V. Meriuts², T.M. Shelest², T.A. Lee², A.N. Klyui³

¹V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics,
Nat. Acad. of Sci. of Ukraine
(41, Nauka Ave., Kyiv 03028, Ukraine;
e-mail: klyui@isp.kiev.ua),

²National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute"
(21, Frunze Str., Kharkiv 61002, Ukraine),

³Taras Shevchenko National University of Kyiv
(64, Volodymyrs'ka Str., Kyiv 01601, Ukraine)

S u m m a r y

Photoelectric characteristics of ITO/CdTe structures fabricated by the thermal evaporation in vacuum followed by their deposition in a quasiclosed volume have been studied before and after treatments of various kinds. Some specimens were subjected to a "chloride" treatment, the others were annealed in air. Afterward, the specimens were treated in hydrogen plasma, and they were covered with a thin diamond-like carbon film. The "chloride" treatment of ITO/CdTe structures is shown to result in an increase of the diffusion length of charge carriers in the CdTe layer. The thermal annealing did not affect this parameter, but significantly enhanced the photosensitivity, which means a reduction of the surface recombination rate in the surface CdTe layer. For all considered ITO/CdTe structures obtained by the thermal evaporation in vacuum, the following treatment in hydrogen plasma and the deposition of thin diamond-like films brought about a substantial increase in the diffusion length of charge carriers in the CdTe layer. The ITO/CdTe structures obtained by the thermal vac-

uum evaporation and treated with hydrogen plasma demonstrated a significant enhancement of their spectral sensitivity in a wavelength range of 400–800 nm, whereas the same effect for structures

subjected to the “chloride” treatment was obtained after the sequential hydrogen plasma treatment and the diamond-like carbon film deposition.