ВИРОБНИЦТВО ОВТ

ДК 621.315.592

О.І. Фіцич

Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного

ДОВГОТРИВАЛА РЕЛАКСАЦІЯ CdHgTe n^+-n–СТРУКТУР, СФОРМОВАНИХ ІОННИМ ТРАВЛЕННЯМ

Проведені експериментальні дослідження довготривалої (більше 7 років) часової релаксації за кімнатних умов електричних параметрів (концентрація та рухливість) n^+-n структур CdHgTe, сформованих іонним травленням. Показано, що параметри зразків після короткотривалої релаксації (порядку 200000 хв), в межах точності експерименту зберігаються протягом довготривалої (більше 7 років) витримки. Таким чином, метод іонного травлення може бути використаний для формування p-n переходів фотодіодів на базі CdHgTe.

Ключові слова: *$Cd_xHg_{1-x}Te$, гетероструктури, іонне травлення, релаксація, концентрація та рухливість носіїв заряду.*

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій

Тверді розчини $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) сьогодні є основним матеріалом для створення багатоелементних приймачів інфрачервоного діапазону спектра 2–20 мкм з граничними параметрами переважно військового призначення (прилади нічного бачення, головки наведення ракет різного класу, системи спостереження та локації тощо) [1]. Такий статус КРТ зумовлений особливостями його зонної структури і, за оцінками спеціалістів, буде залишатися ще принаймні два десятиліття. $Cd_xHg_{1-x}Te$ має найбільше значення відношення коефіцієнта поглинання до темпу термічної генерації незрівноважних носіїв заряду з усіх відомих напівпровідників і штучних напівпровідникових структур (численні квантові ями та надгратки сполук A_3B_5), що забезпечує одержання приймачів із потенційно вищими значеннями основного параметра – питомої здатності до виявлення.

Одним із методів формування *n*-ділянок *p*-*n*–переходів фотодіодів у вакансійно-легованому *p*-$Cd_xHg_{1-x}Te$ є іонне травлення (ІТ), в основі якого лежить взаємодія низькоенергетичних (100–1000 еВ) іонів (переважно Ar) з поверхнею напівпровідника, запропонований в [2]. Властивості модифікованих ІТ шарів КРТ на сьогодні достатньо добре вивчені [3], визначені закономірності і розроблені фізико-математичні моделі перебігу основних процесів під час іонного травлення [4]. Відзначимо деякі з них, необхідні для подальшого розуміння проблеми. У результаті ІТ формується типова n^+-*n*-*p* або n^+-*n* структура [3] з радіаційно порушеним n^+-шаром (товщиною ~ 1-3 мкм) та основним об'ємом конвертованого *n*-шару (товщина залежить від вихідних параметрів матеріалу та режимів ІТ і може досягати сотень мкм). n^+-шар характеризується високими значеннями концентрації електронів (до 10^{17}–10^{18} $см^{-3}$) і низькими значеннями рухливості (~10^4 $см^2/(В·с)$). *n*-шар характеризується постійними значеннями концентрації та рухливості електронів, які відповідають високоякісному матеріалу з низьким рівнем компенсації та який і визначає параметри фотодіодів. Концентрація і рухливість дірок у неконвертованій частині зразка співпадає з вихідними значеннями цих параметрів матеріалу до ІТ. В процесі ІТ в приповерхневій ділянці формується джерело дифузії незрівноважної міжвузлової ртуті (Hg_I) з надзвичайно високою концентрацією (~10^{14} $см^{-3}$) проти ~10^6 $см^{-3}$ для рівноважної концентрації [5]. З одного боку, це зумовлює надшвидке просування фронту дифузії (великі глибини) і повну анігіляцію вакансій ртуті (конверсію типу провідності в матеріалі *p*-типу і модифікацію – зниження рівня компенсації в матеріалі *n*-типу). З другого боку, висока концентрація ртуті призводить до формування в модифікованому (конвертованому) шарі донорних (комплексів та центрів з найбільш відомими акцепторними домішками в КРТ (As, Sb, Cu, Ag, Au) [6] та певними структурними нейтральними дефектами (передбачається, це нанокомплекси Te) [7]. Нарешті, було встановлено [8], що після закінчення процесу ІТ спостерігається сильна

© О.І. Фіцич

релаксація електричних параметрів модифікованого (або конвертованого) шару протягом 10^3-10^5 хв в процесі зберігання зразків за кімнатної температури (будемо називати таку релаксацію короткотерміновою). Природа релаксації пов'язана з розпадом донорних комплексів, сформованих міжвузловою ртуттю з неконтрольованими акцепторними домішками та нанокомплексами Te, присутніми в конкретному матеріалі, внаслідок швидкого зменшення концентрації ртуті після припинення ІТ. Цей факт вимагав проведення спеціальних досліджень з довготривалої стабільності параметрів структур КРТ, модифікованих ІТ, оскільки метод ІТ застосовувався для виготовлення приймачів, у тому числі військового призначення. Перші такі спроби були проведені ще в [9], однак там був зроблений лише якісний висновок, що n^+-n структура, сформована ІТ, зберігається після довготривалого зберігання (10 років) в кімнатних умовах.

Мета роботи. Дослідження кількісних характеристик релаксації параметрів n^+-n структур, сформованих ІТ, протягом довготривалого зберігання.

Виклад основного матеріалу

Експеримент. Для досліджень були використані зразки епітаксійних структур (ЕС) $Cd_xHg_{1-x}Te$, вирощені методом молекулярно-пучкової епітаксії на підкладках (013) GaAs з буферним шаром CdTe/ZnTe [10]. В типовій структурі на границях активного шару $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (склад $x \sim 0.22$) товщиною $d \sim 9$ мкм вирощували варизонні широкозонні захисні шари з товщинами нижнього та верхнього шарів ~1.0 і ~0.3 мкм відповідно, та зміною складу від x ~0.22 до $x \sim 0.45$.

Досліджували номінально нелеговані шари та леговані донорною домішкою In до різних концентрацій ($5\cdot10^{14} – 2\cdot10^{17}$ см$^{-3}$). Параметри зразків після росту та ІТ визначали шляхом вимірювання польових залежностей коефіцієнта Холла R_H (B) і провідності $\sigma(B)$ за T=77 К в магнітних полях B 0.01–1.5 Тл. Отримані залежності аналізували методом дискретного аналізу спектрів рухливості (DMSA) [11], в результаті чого отримували параметри (концентрацію та рухливість електронів) вихідного зразка або основного об'єму модифікованого ІТ n-шару.

Після росту ЕС характеризувалися n–типом провідності, значення концентрації (n_{77}) та рухливості (μ_{n77}) електронів за T=77 К для досліджених ЕС подані у таблиці.

ІТ зразків здійснювали іонами Ar^+ на установці ІВ-3 фірми ЕІКО (Японія) 04.10.2007 р. за наступних режимів: енергія – 500 еВ, густина струму – 0.2 мА/см^2, час – 20 хв. Дослідження процесу короткотермінової релаксації (порядку 200000 хв) електричних параметрів проводили шляхом послідовних вимірювань за 77 К R_H (B) і $\sigma(B)$ зразків, які витримували між вимірюваннями за кімнатної температури, і завершили 12.02.2008 р. Після цього зразки зберігали в кімнатних умовах протягом майже 7 років, і остатнє вимірювання було проведено 19.12.2014 р.

Результати та обговорення. Результати досліджень параметрів структур в процесі релаксації подані на рис. та у таблиці.

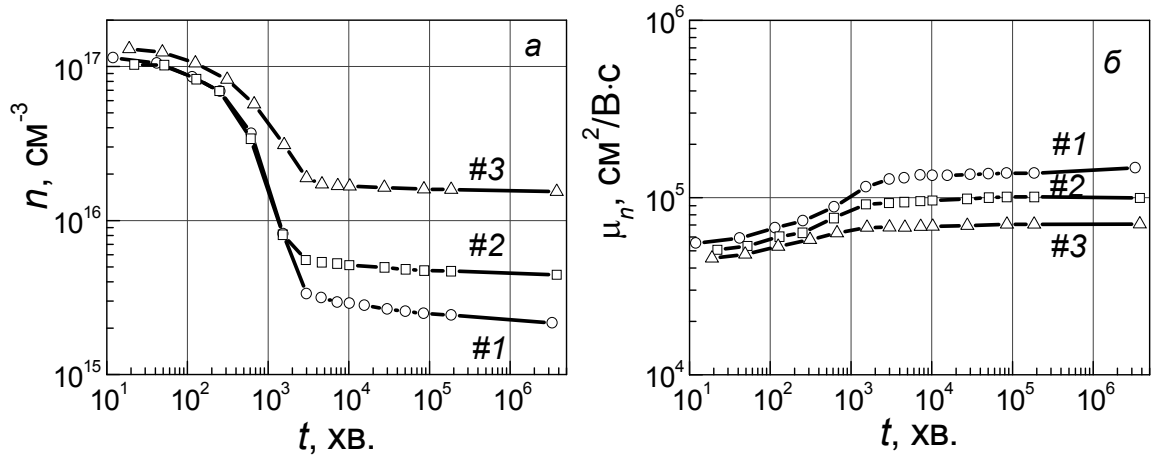

Рис. **Часові залежності концентрації (а) та рухливості (б) електронів основного об'єму модифікованого n-шару за 77 К для зразків $Cd_xHg_{1-x}Te$ в процесі зберігання за кімнатної температури. Останні точки після довготермінової релаксації**

© О.І. Фіцич

Таблиця

Властивості вихідних зразків після ІТ і релаксації

Зразок / Параметр	#1	#2	#3
Товщина Σ*d*, мкм	11,6	11	9,8
Склад *x*, мол.д.	0,215	0,219	0,220
Легування	–	In	In
N_{In}, $см^{-3}$	–	$2,8 \cdot 10^{15}$	$130 \cdot 10^{15}$
Вихідні			
σ_0(77 К), $(Ом \cdot см)^{-1}$	2,252	39,74	125,5
n(77 К), $см^{-3}$	$7,6 \cdot 10^{13}$	$2,2 \cdot 10^{15}$	$1,1 \cdot 10^{16}$
μ_n(77 К), $см^2/(В \cdot с)$	163200	110300	71600
Після іонного травлення			
Час *t*, хв	12	22	19
σ_0(77 К), $(Ом \cdot см)^{-1}$	1073	1001	1022
n(77 К), $см^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{17}$	$1,0 \cdot 10^{17}$	$1,3 \cdot 10^{17}$
μ_n(77 К), $см^2/(В \cdot с)$	55300	50700	45400
Після короткотермінової релаксації			
Час *t*, хв	186810	185770	185870
σ_0(77 К), $(Ом \cdot см)^{-1}$	65,81	94,46	188,8
n(77 К), $см^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{15}$	$4,7 \cdot 10^{15}$	$1,6 \cdot 10^{16}$
μ_n(77 К), $см^2/(В \cdot с)$	137000	101000	70600
Після довготермінової релаксації			
Час *t*, хв	3324570	3790090	3790190
σ_0(77 К), $(Ом \cdot см)^{-1}$	53.15	82.6	180.6
n(77 К), $см^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{15}$	$4,4 \cdot 10^{15}$	$1,5 \cdot 10^{16}$
μ_n(77 К), $см^2/(В \cdot с)$	146900	99500	70800

Як видно, після припинення ІТ для всіх зразків спостерігається сильна релаксація концентрації електронів основного об'єму модифікованого n-шару залежність n77(t) є експоненціальною. Величина n77 в досліджених зразках після ІТ складала ~ 1017 см-3. Згідно з існуючими уявленнями [4] початкова концентрація електронів у зразках КРТ після ІТ визначається сумарною концентрацією донорів (власних і домішкових) та концентрацією донорних комплексів і центрів, сформованих міжвузловою ртуттю з неконтрольованими акцепторними домішками та певними нейтральними структурними дефектами. Оскільки у нелегованому вихідному зразку (#1, табл.) заряджених дефектів з такою концентрацією не видно (n77 = 7,6·1013 см-3, μn77 = 163200 см2/(В·с)), то це свідчить, що такими дефектами є нейтральні структурні дефекти. Така ситуація є характерною для всіх МПЕ структур (дивись, наприклад, [12]), тому передбачається, що таким дефектом можуть бути нанокомплекси Te [7]. А експоненціальна релаксація свідчить про розпад донорного комплексу міжвузлової ртуті з нанокомплексами Te.

Після короткотермінової релаксації концентрація електронів характеризує концентрацію донорного фону NДФ (неконтрольовані донорні домішки та власні дефекти – «антиструктурний» теллур TeHg), яка для зразка #1 дорівнювала 2,4·1015 см-3 і яка в межах точності експерименту лишалася сталою протягом наступних 7 років зберігання. Це стосується і поведінки рухливості. Таким чином, можна зробити висновок, що стабілізація параметрів n+-n структури, сформованої ІТ, відбувається вже на стадії короткотермінової релаксації. Крім того, порівняння параметрів зразків вихідного (до ІТ) та після ІТ і релаксації (зростання концентрації електронів до ~2.4·1015 см–3 при збереженні рухливості) свідчить, що іонне травлення призводить до значного зменшення рівня компенсації за рахунок анігіляції можливих вакансій ртуті та перетворення неконтрольованих акцепторних домішок у донорні центри та їх подальшого розпаду під час релаксації з утворенням стабільних нейтральних центрів.

Що стосується зразків #2 та #3, легованих донорною домішкою In до концентрацій ~ 2,8·1015 1,3·1016 см-3 відповідно, то в загальному процес релаксації є аналогічним до зразка #1. Стабілізація параметрів n+-n структур, сформованих ІТ, також відбувається вже на стадії короткотермінової релаксації. Проте є і відмінності. Стабілізація концентрації електронів відбувається на рівні, якій дорівнює сумі концентрацій донорного фону NДФ = ~2.4·1015 см–3 та введеної домішки In (~ 4.7·1015 та ~1.6·1016 см–3, з врахуванням точності визначення концентрацій донорної домішки).

Висновки

Проведені експериментальні дослідження дозволили вперше кількісно довести, що стабілізація параметрів n^+-n структур (концентрація та рухливість електронів основного об'єму модифікованого n-шару), сформованих іонним травленням в CdHgTe, відбувається вже на стадії короткотермінової релаксації (порядку 200000 хв). Параметри залишаються сталими протягом довготривалої (більше 7 років) витримки. Таким чином, метод іонного травлення може бути використаний для формування *p-n* переходів фотодіодів на базі CdHgTe. Метод іонного травлення дозволяє визначити концентрацію донорного фону в CdHgTe після короткотермінової релаксації, оскільки призводить до зниження рівня компенсації електрично активних дефектів

Список літератури

1. Rogalski A. Infrared Detectors. Second Edition / A. Rogalski. – N.Y.: CRS Press, 2011. – 900 p.

2. Wotherspoon J.T.M.. Methods of manufacturing a detector device / J.T.M. Wotherspoon. – Пат. GB 2095898. – 1981. – 9 p.

© О.І. Фіцич

3. *Mynbaev K.D. Modification of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ properties by low-energy ions / K.D. Mynbaev, V.I. Ivanov-Omskii // Semiconductors. – 2003. – T. 37, № 10. – C. 1127–1150.*

4. Ізжнін І.І. Модифікація властивостей вузькощілинних твердих розчинів $Cd_xHg_{1-x}Te$ при іонному травленні: дис. … докт. фіз.-мат. наук: 01.04.10 / І.І. Ізжнін – Львів, 2007. – 357 с.

5. Bogoboyashchyy V.V. The nature of compositional dependence of p-n junction depth in ion-milled p-$Cd_xHg_{1-x}Te$ / V.V.Bogoboyashchyy, I.I. Izhnin, K.D. Mynbaev // Semicond. Sci. Technol. – 2006.– Vol. 21, N 2. – P. 116–123.

6. Berchenko N.N. Defect structure rebuilding by ion beam milling of As and Sb doped p-$Cd_xHg_{1-x}Te$ / N.N. Berchenko, V.V. Bogoboyashchiy, I.I. Izhnin, A.P. Vlasov // Phys. Stat. Sol. (b). – 2002. – Vol. 229, N 1. – P. 279–282.

7. Izhnin I.I. Conductivity type conversion in ion- milled p-$Hg_{1-x}Cd_xTe$:As heterostructures grown by molecular beam epitaxy / I.I. Izhnin, S.A. Dvoretsky, N.N. Mikhailov, Yu.G. Sidorov, V.S. Varavin, K.D. Mynbaev, M. Pociask // Appl. Phys. Lett. – 2007. – Vol. 91, N 13. – P. 132106.

8. Belas E. Time relaxation of points defects in p- and n-(HgCd)Te after ion beam milling / E. Belas, V.V. Bogoboyashchii, R. Grill, I.I. Izhnin, A.P. Vlasov, V.A. Yudenkov // J. Electron. Mater. – 2003. – Vol. 32, N 7. – P. 698–702.

9. Богобоящий В.В. Релаксація електричних параметрів структур, сформованих іонним травленням у вузькощилинному $Cd_xHg_{1-x}Te$ / В.В. Богобоящий, І.І. Ізжнін, Ф.Ф. Сизов, В.О. Юденков // Доповіді НАН України. – 2004. – № 4. – С. 70–75.

10. Varavin V.S. HgCdTe Epilayers on GaAs: Growth and Devices / V.S.Varavin, V.V.Vasiliev, S.A.Dvoretsky, N.N.Mikhailov, V.N.Ovsyuk, Yu.G.Sidorov, A.O.Suslyakov, M.V.Yakushev, A.L.Aseev // Opto-Electronics Review. – 2003. – Vol. 11, № 2. – P. 9–9111.

11. Богобоящий В.В. О физическом смысле огибающей спектров подвижности / В.В. Богобоящий, И.И. Ижнин // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2003. – №. 2.– С. 10–13.

12. Izhnin I.I. Defect structure of HgCdTe films grown by molecular-beam epitaxy on Si sabstrates / I.I. Izhnin, A.I. Izhnin, H.V. Savytskyy, M.M. Vakiv, Y.M. Stakhira, O.I. Fitsych, M.V. Yakushev, A.V. Sorochkin, I.V. Sabinina, S.A. Dvoretsky, Yu.G. Sidorov, V.S. Varavin, M. Pociask-Bialy, K.D. Mynbaev // Semicond. Sci. Technol.– 2012.– Vol. 27, № 3, 035001 (4pp).

Рецензент: д. фіз.-мат. н., проф. Й.М. Стахіра, завідувач кафедри фізики напівпровідників факультету електроніки Львівського національного університету імені Івана Франка, м. Львів.

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ CDHGTE N^+-N–СТРУКТУР, СФОРМИРОВАННЫХ ИОННЫМ ТРАВЛЕНИЕМ

Е.И. Фицыч

Проведены экспериментальные исследования долговременной (более 7 лет) временной релаксации при комнатных условиях электрических параметров (концентрация и подвижность) n^+-n структур CdHgTe, сформированных ионным травлением. Показано, что параметры образцов после кратковременной релаксации (порядка 200000 мин.), в пределах точности эксперимента сохраняются в течении долговременной (более 7 лет) выдержки. Таким образом, метод ионного травления может быть использован для формирования p-n переходов фотодиодов на основе CdHgTe.

Ключевые слова: *$Cd_xHg_{1-x}Te$, гетероструктуры, ионное травление, релаксация, концентрация и подвижность носителей заряда.*

LONG TERM RELAXATION OF CDHGTE N^+-N–STRUCTURES FORMED WITH ION MILLING

O.Fitsych

Experimental studies of long-term (more than 7 years) temporal relaxation at the room terms of electric parameters (concentration and mobility) of the CdHgTe n^+-n structures formed by an ion milling are studied. It is shown that parameters of samples after short-term relaxation (about 200000 min), are saved during of long-term aging. Thus, the method of ion milling can be used for forming of p- n junction of CdHgTe photodiodes.

Key words: *$Cd_xHg_{1-x}Te$, heterostructures, ion milling, relaxation, concentration and mobility of charge carriers*

© О.І. Фіцич