

УДК 621.383

Особенности формирования диффузионных $p-n$ -переходов в варизонных эпитаксиальных структурах на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$

А. П. Власов, В. К. Писаревский, А. В. Шевченко
Львовский национальный университет им. Ив. Франко, г. Львов, Украина

А. Ю. Бончик
Львовский институт прикладных проблем механики и математики Академии наук Украины,
г. Львов, Украина

А. Барч
Институт физики Польской академии наук, г. Варшава, Польша

Представлены результаты исследований варизонных фоточувствительных структур, созданных на основе диффузионного легирования мышьяком $Cd_xHg_{1-x}Te$ n -типа проводимости. Диффузионные профили распределения As определялись посредством SIMS-анализа. Определены эффективные коэффициенты диффузии As в монокристаллах $Cd_xHg_{1-x}Te$ с незначительным градиентом состава в диффузионной области при $T = 550$ °С. Исследованы спектральные и вольтамперные характеристики полученных варизонных фоточувствительных структур. Результаты проведенных экспериментов показывают высокую электроактивность As в рассматриваемых образцах.

Твердые растворы $Cd_xHg_{1-x}Te$ в настоящее время занимают ведущие позиции в качестве материала для создания пороговых фотовольтаических приемников ИК-излучения. Получение стабильных $p-n$ -переходов для создания многоэлементных приборов требует использования гетероструктур, в которых область залегания $p-n$ -перехода сформирована в более узкозонном материале с контролируемой и повторяемой

концентрацией как донорной, так и акцепторной примеси. Акцепторной примесью для создания высококачественных p^+-n -переходов служит мышьяк, который в большинстве случаев вводят в $Cd_xHg_{1-x}Te$ с помощью ионной имплантации. Для его полной активации и диффузии на определенную глубину применяется диффузионный отжиг [1].

Проведенный анализ литературных данных свидетельствует, что в зависимости от методики получения $Cd_xHg_{1-x}Te$, степени отклонения от стехиометрии и его структурного совершенства (плотности дислокаций) мышьяк занимает различные позиции в кристаллической решетке $Cd_xHg_{1-x}Te$, выступая донором (в ртутной подрешетке) или акцептором (в теллуровой подрешетке). Кроме того, возможно также образование нейтральных примесных комплексов. Результатом этого является многокомпонентный механизм диффузии мышьяка в кристаллической решетке $Cd_xHg_{1-x}Te$ [2—4]. Актуальным остается вопрос исследования диффузии As при высоких температурах $T \geq 450$ °C [2]. Цель данной работы — исследовать процессы диффузионного легирования мышьяком структур на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ при $T \geq 450$ °C.

Методика эксперимента

Приведены результаты экспериментальных исследований по применению ионной имплантации, а также низко- и высокотемпературной эпитаксии $Cd_xHg_{1-x}Te$ для твердофазного диффузионного легирования базового материала акцепторной примесью.

Ионная имплантация (при комнатной температуре) и низкотемпературная (температура осаждения для диапазона составов $0 \leq x \leq 0,95$ не превышает 260 °C) эпитаксия в высокочастотной ртутной плазме с локализацией разряда в квазизамкнутом объеме использованы для создания контролируемого источника примеси [5].

Высокотемпературная эпитаксия в закрытой системе прямым переносом вещества с контролируемым давлением паров ртути, при которой на этапах конденсации и диффузии четко фиксируются температура и давление паров ртути в зоне роста (метод испарение—конденсация—диффузия — ИКД) [6, 7], использована для легирования мышьяком приповерхностных областей эпитаксиальных структур на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ при температурах $T \geq 500$ °C. На завершающей стадии эпитаксиального наращивания (при высоком давлении паров ртути в ампуле) происходят процессы взаимодиффузии между подложкой и наращенным слоем. Поэтому состав на поверхности слоя стабилизируется во времени за счет уравнивания диффузионных потоков

основного вещества при заданном рабочем давлении паров ртути. Избежание зарождения слоя или возможный его рост с довольно небольшой скоростью обеспечивают термодинамически равновесные условия для исследования процессов взаимодиффузии и твердофазной диффузии примеси в приповерхностных слоях эпитаксиальных структур в температурном интервале 500—600 °C.

После завершения высокотемпературной диффузии проводился длительный низкотемпературный отжиг в насыщенных парах ртути (при температуре 320/300 °C на протяжении 72 ч) для залечивания ртутных вакансий и возвращения *n*-базы в исходное состояние по собственным дефектам.

Эксперимент

Исходным материалом при использовании в качестве источника примеси легированной эпитаксиальной пленки, полученной ВЧ-распылением в Hg-глюющем разряде, служили монокристаллы $Cd_xHg_{1-x}Te$, $x = 0,19$ и $x = 0,3$, при ионной имплантации — эпитаксиальный слой $Cd_xHg_{1-x}Te$, полученный методом ИКД. Измеренные перед ионной имплантацией или наращиванием легированного эпитаксиального слоя электрофизические свойства образцов и характеристики источников диффузанта представлены в таблице.

Поверхность монокристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$ полировалась с помощью безабразивной химико-механической полировки. На финише перед процессом имплантации или эпитаксиального наращивания легированного слоя поверхности всех образцов обрабатывались в бром-метанольном травителе.

Ионная имплантация осуществлялась на ионно-лучевой установке МРВ-202 фирмы Balzers. Граничное давление в рабочей камере составляет $2,7 \cdot 10^{-7}$ торр. Отсчет дозы введенной примеси осуществляется интегратором с точностью 0,02 %. При получении легированных поверхностных эпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ в процессе высокочастотного распыления с четким контролем их состава, примесь вводили при изготовлении мишени, используя навеску мышьяка.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ДИФфузАНТА

Образец	x	$N_d - N_a, \text{ см}^{-3}$	$\mu_{77\text{К}}, \text{ см}^2/\text{Вс}$	Характеристики источника диффузанта				
				x	d, мкм	$N_{As}, \text{ см}^{-3}$	E, кэВ	Доза, см^{-2}
МО2	0,19	$2,3 \cdot 10^{14}$	$2,6 \cdot 10^5$	0,22	3	$3,72 \cdot 10^{17}$	—	—
МО3	0,3	$3,8 \cdot 10^{14}$	$7,2 \cdot 10^4$	0,26	4	$3,72 \cdot 10^{17}$	—	—
45-1	0,26	$1,1 \cdot 10^{15}$	$2,7 \cdot 10^4$	—	—	—	80	$5 \cdot 10^{15}$

По окончании процесса имплантации (эпитаксиального наращивания) образцы монтировались в кварцевые ампулы и загружались в двухзонные резистивные печи для проведения диффузионного и длительного изотермического отжига. Охлаждение ампул после отжига осуществлялось непосредственно в печи после ее отключения.

Для исследования распределения концентрации атомов As по глубине использовалась экспериментальная методика масс-спектропии вторичных ионов (SIMS) на установке Cameca IMS-6F с границей чувствительности прибора в пределах от $5 \cdot 10^{14}$ до $1 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Тип проводимости, концентрация носителей заряда и их подвижность при температуре 77–300 К определялись по стандартной методике холловских измерений в диапазоне магнитных полей 0–1,8 Тл. Состав твердого раствора контролировался по спектрам оптического поглощения и по длинноволновому спаду фотопроводимости. Формирование фотодиодных структур проводилось по мезотехнологии без защиты поверхности для подтверждения эффективности процесса легирования $Cd_xHg_{1-x}Te$ примесью As. Готовые диоды монтировались в разборном металлическом криостате со сменными окнами для проведения измерений ВАХ и спектральных характеристик. Спектральное распределение фоточувствительности определялось спектрографом ИКС-21, а вольт-ваттная чувствительность — с помощью абсолютно черного тела (АЧТ) с регулируемой температурой. Для визуализации $p-n$ -перехода и определения глубины его залегания исследуемые диоды размещались на подвижном столике объектов растрового электронного микроскопа РЕМН-2, который может работать в режиме тока, наведенного электронным пучком ТНЭП (ЕВИС).

Результаты эксперимента и их анализ

Проведены эксперименты по созданию диффузионных $p-n$ -переходов и их исследованию в исходно варизонном базовом материале — эпитаксиальном слое n -типа проводимости, выращенный методом ИКД (образец 45-1). Источником примеси служила ионно-имплантированная поверхность эпитаксиального слоя, исходные электрофизические свойства и режимы имплантации см. в таблице. Образец 45-1-II As-D5 получен в результате проведения диффузионного процесса при температуре 500 °С на протяжении 4 ч. Этот образец был использован для изготов-

ления мезафотодиодов с незащищенной поверхностью. Методом ТНЭП определена глубина залегания $p-n$ -перехода (9,1 мкм от поверхности эпитаксиального слоя).

На рис. 1 представлены ВАХ и зависимость дифференциального сопротивления, нормированного на площадь от напряжения на фотодиоде (при $T \sim 80$ К) одного из таких диодов, а на рис. 2 показано нормализованное спектральное распределение фотоответа на мощность излучения АЧТ. Длина волны на уровне 1/2 от максимума сигнала этого фотодиода $\lambda_{co} = 4,7$ мкм.

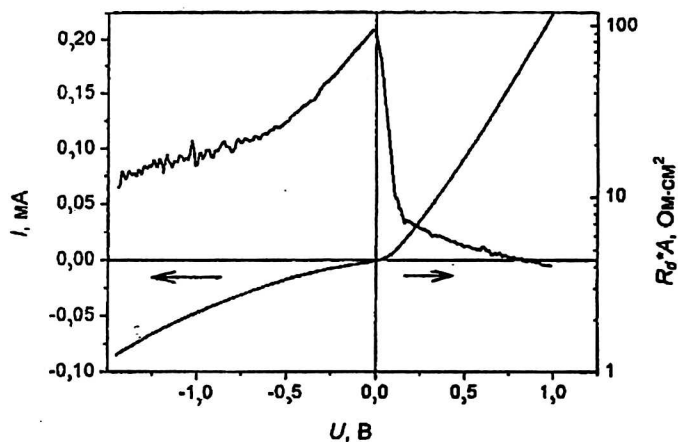


Рис. 1. ВАХ и зависимость дифференциального сопротивления, нормированного на площадь от напряжения фотодиода, полученного на диффузионной структуре образца 45-1-II As-D5 ($T = 78$ К)

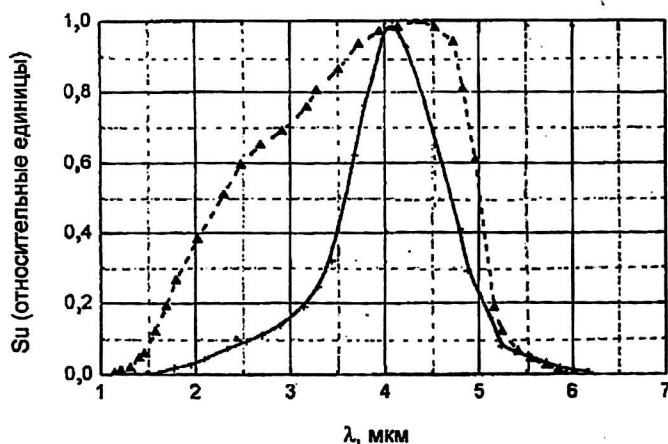


Рис. 2. Спектральное распределение фотосигнала фотодиодов, изготовленных из образцов: ———— — MO3-786-D6; ————— — 45-1-II As-D5

Диффузия примеси проходила в направлении расширения запрещенной зоны варизонной структуры. Для определения влияния внутренней варизонности в эпитаксиальной структуре на процесс диффузии As были проведены следующие эксперименты.

Образец МО3-786-D6 на основе монокристалла МО3 (см. таблицу), в котором источником примеси служил более узкозонный эпитаксиальный слой ($x = 0,26$), полученный в результате проведения диффузионного процесса при температуре 550 °С на протяжении 1 ч. На рис. 3 показаны профили распределения концентрации As, а также линия сигнала 202Hg по глубине, которые сняты для этой структуры с помощью вторичной масс-спектрометрии при использовании в качестве первичного пучка ионов 133Cs, а также положение металлургической границы эпитаксиальный слой — монокристалл, которая определялась на поперечном сколе образца с помощью металлографического микроскопа.

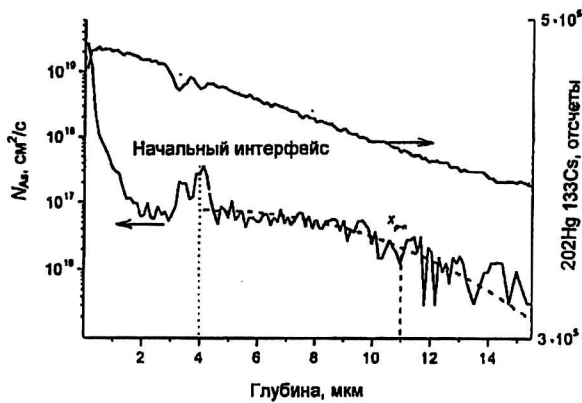


Рис. 3. SIMS-профили распределения мышьяка и ртути в диффузионной варизонной структуре образца МО3-786-D6: — SIMS-профиль; - - - - граница данных; $D = 2,3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$

Принимая, что в нашем случае имеет место диффузия из ограниченного источника (как первое приближение), которую можно описать уравнением [8]

$$N(x, t) = \frac{N_{As}}{2} \left[-\text{erf}\left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{Dt}}\right) + \text{erf}\left(\frac{x + x_0}{2\sqrt{Dt}}\right) \right], \quad (1)$$

из экспериментальной кривой методом наименьших квадратов определен эффективный коэффициент диффузии As в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при $T = 550 \text{ °С}$ и начальном составе базового материала $x = 0,303$

$$D_{As}(550 \text{ °С}, x \approx 0,303) = 2,3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}.$$

На рис. 4 показана ВАХ одного из изготовленных мезодиодов на основе образца МО3-786-D6. Здесь же показана зависимость дифференциального сопротивления от напряжения. По изображению, полученному методом ТНЕП, определена глубина залегания $p-n$ -перехода (6,7 мкм от металлургической границы раздела исходного гетероперехода), которая показана на рис. 3. Нормированное спектральное распределение

фотосигнала для этих диодов приведено на рис. 2. Длина волны на уровне 1/2 от максимума сигнала для этого фотодиода ($\lambda_{co} = 5,05 \text{ мкм}$) соответствует меньшему составу $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, чем у монокристалла, из которого изготовлен диод. Это связано с тем, что p -область $p-n$ -перехода сформирована более узкозонным $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, чем база n -типа. Тогда носители, генерированные в узкозонной части, не будут разделяться $p-n$ -переходом вследствие потенциального барьера в зоне проводимости $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$.

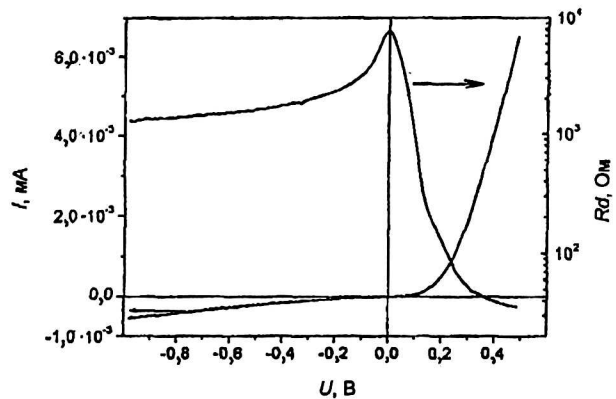


Рис. 4. ВАХ и зависимость дифференциального сопротивления от напряжения фотодиода, полученного на диффузионной структуре образца МО3-786-D6 ($T = 80 \text{ К}$)

Диффузионным процессом ($T = 550 \text{ °С}$ на протяжении 1 ч) на основе гетероструктуры, состоящей из монокристалла МО2 (см. таблицу), на поверхность которого наращен легированный эпитаксиальный слой с более широкой запрещенной зоной ($x = 0,22$), был создан образец МО2-789-D6. На рис. 5 показаны профили распределения концентрации As, а также линия сигнала 202Hg по глубине варизонной структуры. Из образца МО2-789-D6 изготовлены мезафотодиоды с незащищенной поверхностью на диапазон 8—14 мкм. ВАХ при $T \sim 80 \text{ К}$ одного из диодов представлена на рис. 6.

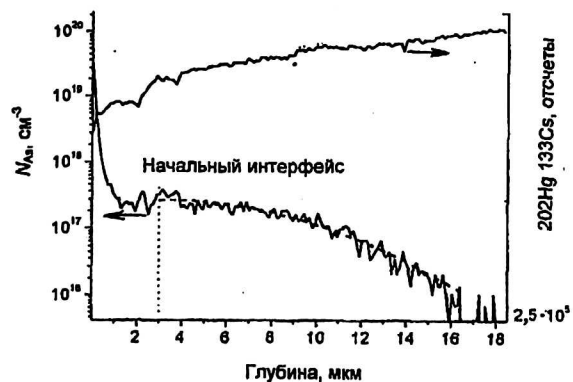


Рис. 5. SIMS-профили распределения мышьяка и ртути в диффузионной варизонной структуре образца МО2-789-D6: — SIMS-профиль; - - - - граница данных; $D_{As} = 1,8 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$

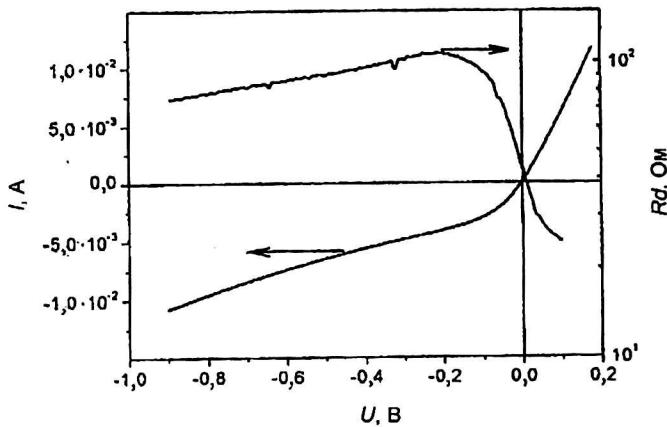


Рис. 6. ВАХ и зависимость дифференциального сопротивления от напряжения фотодиода, полученного на диффузионной структуре образца МО2-789-Д6 ($T = 78 \text{ K}$)

Используя формулу (1), провели расчет эффективного коэффициента диффузии As в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с начальным составом поверхности базового материала $x = 0,19$ при $T = 550 \text{ }^\circ\text{C}$

$$D_{\text{As}}(550 \text{ }^\circ\text{C}, x \approx 0,19) = 1,8 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}.$$

Сравнивая SIMS-профили образцов МО3-786-Д6 и МО2-789-Д6 по линиям сигнала ^{202}Hg , можно увидеть, что при таких условиях термической обработки процесс взаимодиффузии основных компонент проходит не полностью и, как следствие этого, не приводит к выравниванию состава в приповерхностных областях образца, т. е. формируется варизонная структура. Скорость процессов взаимодиффузии основных компонент твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ на несколько порядков превышает скорость диффузии примеси [9]. Следует заметить, что диффузия As в образце МО3-786-Д6 проходит в направлении расширения ширины запрещенной зоны полупроводника, а МО2-789-Д6 — сужения. Поэтому необходимо учитывать влияние внутренних электрических полей на процесс диффузии электрически активной примеси [10]. Тем не менее в наших экспериментах не наблюдается их существенного

влияния, что может быть связано с небольшими градиентами ширины запрещенной зоны в исходных гетероструктурах.

Заключение

Независимо от влияния внутренних электрических полей, эффективный коэффициент диффузии As для $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x = 0,19-0,303$ при высоких температурах ($T \geq 500 \text{ }^\circ\text{C}$) выше в материале с большим содержанием Cd.

Определены эффективные коэффициенты диффузии As в монокристаллах $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с незначительным градиентом состава в диффузионной области при $T = 550 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$D_{\text{As}}(550 \text{ }^\circ\text{C}, x \approx 0,303) = 2,3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с};$$

$$D_{\text{As}}(550 \text{ }^\circ\text{C}, x \approx 0,19) = 1,8 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}.$$

Исследования фоточувствительных варизонных структур подтверждают эффективность высокотемпературной обработки ($T = 500-550 \text{ }^\circ\text{C}$) при активации акцепторной примеси.

Литература

1. Rogalski A.// Defence Science Journal. 2001. V. 51. № 5.
2. Shaw D.// Semicond. Sci. Technol., 2000. V. 15. P. 911.
3. Bubulac L. O., Irwine S. J., Gerther E. R., Bajaj J., Lin W. P. and Zucca R.// Ibid. 1993. V. 8. № 270.
4. Vydyanath H. R.// J. Crystal Growth, 1996.V161. № 64.
5. Устройство для нанесения покрытий: А. с. СССР 1480362/ Савицкий В. Г., Мансуров Л. Г., Милянчук М. В., Симкив Б. А. 04.08.1987.
6. Способ получения эпитаксиальных слоев бинарных п/п соединений: А. с. СССР 668504/Алексеевко Л. И., Берченко Н. Н., Кревс В. Е., Марончук И. Е., Пухов Ю. Г., Савицкий В. Г., Филатова А. К. 23.07.1975.
7. Savitsky V. G., Storchun O. P. Thin Solid Films. 1998. V. 317. № 105.
8. Технология микроэлектронных устройств: Справочник 3. Ю. Готра. — М.: Радио и связь, 1991.
9. Берченко Н. Н., Кревс В. Е., Средин В. Г. Полупроводниковые твердые растворы и их применение: Справочные таблицы. — М.: Воениздат, 1982.
10. Соколовский Б. С., Монастырский Л. С.// ФТП, 1997. V. 31. № 1332.

Peculiarities of diffusion p – n -transition formation in $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ graded-band-gap epitaxial structures

A. P. Vlasov, V. K. Pysarevsky, A. V. Shevchenko
Ivan Franko National University, Physical Department, Lviv, Ukraine

A. Yu. Bonchuk
Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of NASU, Lviv, Ukraine

A. Barcz
Institute of Physics of Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

Investigation results of graded-band-gap photosensitive epitaxial structures based on $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ of n -type doped by As are presented. The diffusion profiles of the As distribution were determined by the SIMS analysis. Effective diffusion coefficients of As at $T = 550$ °C in the single $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ crystals with a negligible composition gradient in the diffusion area. Spectral and current-voltage characteristics of the graded-band-gap structures have been investigated. The obtained results exhibit a high electroactivity of As in the investigated regions of the samples.