

УДК 621.315.592

Конверсия типа проводимости в легированных примесями I группы монокристаллах $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при ионном травлении

В. В. Богобоящий

Кременчугский государственный политехнический университет, г. Кременчуг, Украина

И. И. Ижнин

НИИ материалов «Научно-производственное предприятие "Карат"», г. Львов, Украина

К. Р. Курбанов

Институт экономики и новых технологий, г. Кременчуг, Украина

Экспериментально доказано существование глубокой (10–30 мкм) p - n -конверсии типа проводимости при ионном травлении в легированных Cu , Ag или Au монокристаллах p - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Предложен механизм конверсии, связанный с вытеснением примесных атомов, занимавших катионные позиции, в междоузлия в процессе диффузии междоузельной ртути, образуемой при ионном травлении. Показано, что такие донорные центры являются нестабильными, и после релаксации проводимость в конвертированном слое определяется неконтролируемыми донорами. Рассмотрены возможные причины отсутствия полной реконверсии из n в исходный p -тип.

Конверсия типа проводимости при ионном травлении (ИТ) вакансионно-легированного p - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ, тип проводимости которого обусловлен вакансиями Hg) является перспективным низкотемпературным методом создания p - n -переходов для матричных ИК-фотодиодов [1] и уже сегодня применяется рядом фирм [2, 3]. Свойства конвертированных при ИТ слоев n -типа детально проанализированы в работе [4]. Установлено, что слой n -типа проводимости, возникающий вследствие ИТ КРТ, неоднороден. Его наружная часть (~3 мкм) характеризуется высокой концентрацией электронов (до 10^{18} см^{-3}), которая быстро убывает в глубь образца, и низкой подвижностью ($\sim 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) [5, 6]. Под ней расположен более толстый однородный n -слой (глубинная конверсия), электрические свойства которого близки к свойствам нелегированного КРТ n -типа [5]. Считается общепринятым, что конверсия типа проводимости основной части этого слоя обусловлена сверхбыстрой диффузией междоузельных атомов (Hg_i), образующихся на поверхности при ИТ, и их взаимной аннигиляцией с содержащимися там вакансиями ртути (V_{Hg}) [7], а n -тип проводимости конвертированного слоя связан со стабильными остаточными донорами и, возможно, с антиструктурным теллуром [8–10]. В свою очередь сверхбыстрая диффузия междоузельных атомов ртути обусловлена образованием при ИТ поверхностного источника ртути чрезвычайно большой концентрации ($\sim 10^{12}–10^{13} \text{ см}^{-3}$) [11].

В последнее время в области ИТ КРТ был получен ряд важных фактов. Установлено, что глубинная p - n -конверсия в результате ИТ наблюдается также в легированных элементами

V группы As [12–14] и Sb [15] образцах КРТ p -типа, где вакансии отсутствовали. Механизм конверсии и в этом случае связан со сверхбыстрой диффузией междоузельной ртути и ее взаимодействием с акцепторной примесью, в результате чего образуются донорные комплексы: атом As в подрешетке Te – междоузельный атом Hg [16]. Кроме того, имеются сообщения о наблюдении p - n -конверсии в легированном элементе I группы (Au [17]; Cu и Ag [18, 19]) безвакансионном p -КРТ. В работе [20] был предложен механизм такой конверсии, также связанный со сверхбыстрой диффузией междоузельной ртути и вытеснением ею примесных атомов (Au , Cu или Ag) из катионных узлов в междоузлия, где они становятся донорами. Однако факт существования именно глубинной конверсии в этом случае требует более надежного экспериментального обоснования.

Установлено, что электрические параметры конвертированного в процессе ИТ n -слоя изменяются при хранении при комнатной температуре, а параметры и характер релаксации – типичные времена и сам ход кривых изменения электрических характеристик – зависят от технологии получения исходного материала [21, 22]. Предполагается, что причиной этого является нестабильность указанных выше донорных центров, образованных при ИТ элементами I и V групп, которые являются основными неконтролируемыми примесями в КРТ [21, 23].

Цель работы – детальное исследование процессов конверсии типа проводимости при ИТ в легированном Au , Cu или Ag p -КРТ, что важно для эффективного применения технологии ИТ для получения стабильных фотодиодов на основе КРТ.

Эксперимент

В работе исследованы монокристаллические образцы p - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$), легированные Cu, Ag или Au, полученные методом вертикальной направленной кристаллизации с подпиткой из твердой фазы (ОАО "Чистые металлы", г. Светловодск, Украина). Соответствующая примесь вводилась из напыленного поверхностного источника в образцы n - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($n \sim 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) в процессе термического отжига в насыщенных парах Hg при 573 К в течение 72 ч, что обеспечивало однородное легирование пластин толщиной ~ 1 мм. Некоторые параметры образцов представлены в таблице.

Ионно-лучевое травление ионами Ar^+ проводили на установке IB-3 фирмы EIKO (Япония) при режимах: энергия ионов $E = 500$ эВ; плотность тока ионов $j = 0,2\text{--}0,35 \text{ мА/см}^2$; продолжительность травления $t = 600\text{--}1200$ с (см. таблицу).

Для характеристики исходных образцов и p - n -структур, сформированных ИТ, а также процесса их релаксации при изотермическом хранении и изохронном отжиге исследовались полевые зависимости коэффициента Холла и удельного сопротивления при 77 К в магнитных полях 0,01–1,5 Тл. Прецизионные гальваномагнитные измерения (инструментальная погрешность не превышала 1 %) проводили по стандартной методике на постоянном токе в конфигурации Ван-дер-Пау. Полученные зависимости анализировались методом спектров подвижности (MSA) [24], что позволило разделить вклады и определить концентрации и подвижности различных групп носителей в процессе релаксации p - n -структур: электронов в конвертированном слое, дырок остаточного объема p -типа.

Номер образца	Примесь	Режим ИТ j , мА·см ⁻² / t , мин	Параметры образцов								
			σ , Ом/см	p , 10^{16} см^{-3}	μ_p , см ² /В·с	d_j , мкм	n , 10^{16} см^{-3}	μ_n , см ² /В·с	τ_1 , мин	τ_2 , мин	τ_3 , мин
1a	Cu	0,2 / 10	2,109	2,84	450	13	1,2	65000	—	40	200
1b	Cu	0,2 / 15	2,163	2,78	470	17	1,0	70000	—	250	5000
2a	Ag	0,3 / 20	2,65	5,68	290	21	2,0	50000	—	75	5000
2b	Ag	0,3 / 20	3,532	5,23	410	16	4,6	60000	60	400	—
3a	Au	0,35 / 20	1,375	1,69	490	34	1,3	95000	—	220	15000
3b	Au	0,35 / 20	1,416	1,8	470	35	1,8	70000	—	1100	90000

Примечание. σ , p , μ_p — проводимость, концентрация и подвижность тяжелых дырок в исходном образце при 77 К, соответственно; d_j — толщина конвертированного n -слоя; n , μ_n — начальная концентрация и подвижность электронов в основном объеме конвертированного n -слоя при 77 К; τ_1 , τ_2 , τ_3 — характеристические времена релаксации.

Непосредственно после ИТ с исследуемого образца удалялся поверхностный нарушенный слой (4 мкм) химическим травлением в растворе Br_2 в HBr для облегчения последующего анализа экспериментальных результатов. Первое измерение проводилось через 15–20 мин после ИТ. Далее все образцы хранили при температуре 293 ± 1 К (индекс a) или 273 К (индекс b), периодически измеряя полевую зависимость интегрального коэффициента Холла R_H и интегральной проводимости σ при $T = 77$ К. После релаксации (выхода R_H и σ на насыщение) образцы, хранившиеся при 273 К, подвергались многостадийному изохронному отжигу в диапазоне температур 273–413 К с шагом 20 К и временем выдержки на каждой стадии 30 мин. Для определения толщины конвертированного слоя было выполнено послойное химическое травление образцов, прошедших релаксацию при 293 К с шагом 1–3 мкм с измерением R_H и σ при 77 К после каждого шага травления.

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования показали, что основной объем конвертированного слоя, образованного в результате ИТ образцов p - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, легированных Cu, Ag или Au, оставшийся после удаления с поверхности ~ 4 мкм материала нарушенного слоя, содержит преимущественно один тип электронов. На рис. 1, a в качестве примера представлены зависимости концентрации и подвижности этих электронов при 77 К от времени выдержки при 273 К (зависимости, полученные при 293 К, имеют аналогичный вид). Зависимости концентрации электронов в основном объеме конвертированного n -слоя от температуры изохронного отжига представлены на рис. 1, b . Видно, что в процессе изотермического хранения средняя подвижность электронов при $T = 77$ К постепенно вырастает от $(5\text{--}6) \cdot 10^4$ до $(8\text{--}15) \cdot 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ (см. рис. 1, b и таблицу), а их концентрация экспоненциально уменьшает-

ся, начиная приблизительно от $(1-2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (см. рис. 1, а).

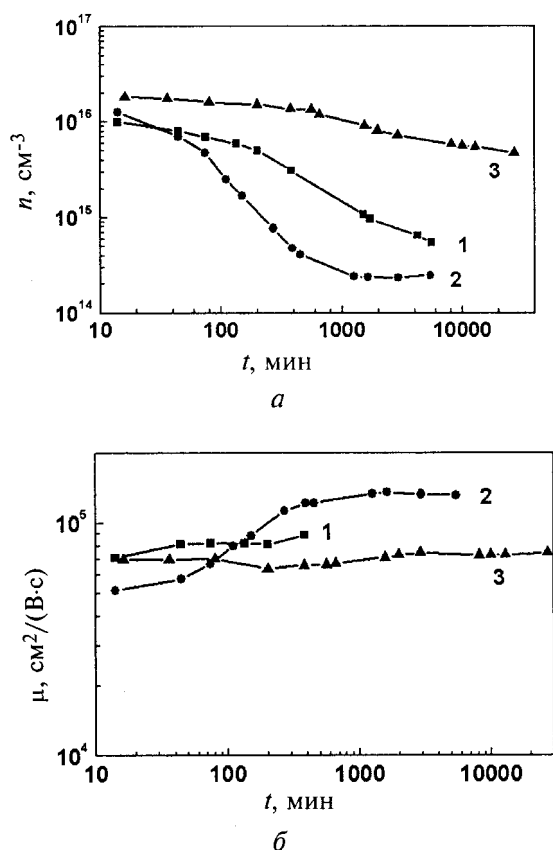


Рис. 1. Зависимости концентрации (а) и подвижности (б) электронов в основной части конвертированного n -слоя при 77 К от длительности выдержки при 273 К для образцов $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, легированных: 1 — Cu; 2 — Ag; 3 — Au

Закон релаксации концентрации электронов со временем при обеих температурах выдержки соответствует реакции первого порядка и характеризуется наличием 2–3 участков с разными временами релаксации (см. таблицу). Если считать, что обратное время релаксации ($1/\tau$) зависит от температуры по активационному закону Аррениуса, то по этим данным, например для быстрой релаксации, описываемой временем τ_2 , найдем:

$$\begin{aligned}\tau_{2\text{Cu}} &= 3,2 \cdot 10^{-8} \exp(0,632 \text{ эВ}/k_B T) \text{ с}; \\ \tau_{2\text{Ag}} &= 5,4 \cdot 10^{-7} \exp(0,577 \text{ эВ}/k_B T) \text{ с}; \\ \tau_{2\text{Au}} &= 1,5 \cdot 10^{-6} \exp(0,555 \text{ эВ}/k_B T) \text{ с}.\end{aligned} \quad (1)$$

Видно, что энергии активации для всех трех примесей близки; при этом релаксация доноров оказывается самой быстрой в случае с Ag и самой медленной — в случае с Au.

После завершения релаксации подвижность электронов достигает значений $\sim (1-1,5) \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, т. е. оказывается достаточно высокой. Начальная

концентрация электронов в конвертированном слое близка к исходной концентрации примеси, особенно в случае легированных Cu образцов. В случае легированных Ag кристаллов начальная концентрация подвижных электронов в конвертированном слое оказалась меньше, чем ожидалось. Можно предположить, что такая особенность есть результат либо меньшей способности Ag к переходу в междоузлия, либо быстрой релаксации образовавшихся доноров; в пользу последнего предположения свидетельствует присутствие дополнительного малого времени релаксации τ_1 , обнаруженной в случае Ag при 273 К (см. таблицу).

Отметим также, что обнаруженные глубины конверсии (см. таблицу) практически совпали со значениями, ожидаемыми для этого механизма в данных условиях согласно модели конверсии [11] в вакансионно-легированном КРТ при равных концентрациях акцепторных центров и условий ИТ.

Представляется важным, что в результате релаксации конвертированного слоя при комнатной температуре или в ледяной воде обратная конверсия из n в p -тип не наблюдается — слой сохраняет электронный тип проводимости с остаточной концентрацией электронов $(0,5-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, которая близка к концентрации неконтролируемых доноров в исходных образцах. Напротив, при изохронном отжиге образцов, предварительно выдержанных до насыщения релаксационной кривой (рис. 2), концентрация электронов снижается вплоть до обратной реконверсии слоя в p -тип, наблюдающейся при $T \geq 393 \text{ К}$. Аппроксимация закона релаксации экспоненциальной зависимостью с характерным временем τ дает в этом случае активационный закон следующего вида, например, для меди:

$$\tau = 5 \cdot 10^{-3} \exp(0,42 \text{ эВ}/k_B T). \quad (2)$$

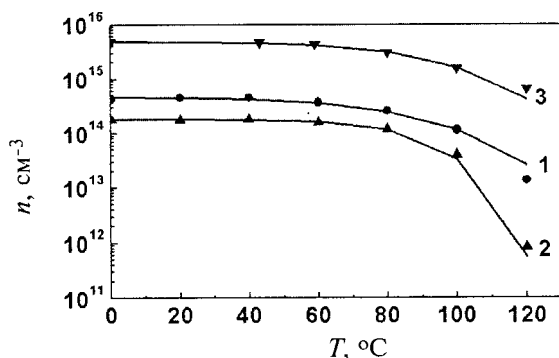
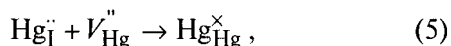
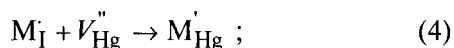
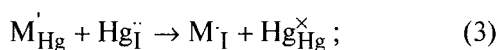


Рис. 2. Зависимости концентрации электронов в основном объеме конвертированного n -слоя легированных образцов $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ от температуры изохронного отжига: 1 — Cu; 2 — Ag; 3 — Au

Полученные результаты убедительно показывают, что и медь, и серебро, и золото способны к сильному квазихимическому взаимодействию с

собственными дефектами, что в частности проявляется в глубокой конверсии типа проводимости при ИТ.

Для обоснования этого вывода рассмотрим соответствующую модель дефектной структуры легированного КРТ. Следуя [25], примем, что примеси I группы периодической системы способны создавать в КРТ точечные дефекты двух видов: отрицательно заряженные центры замещения M_{Hg}' (акцепторы) и положительно заряженные центры внедрения M_I (доноры); здесь M символизирует Cu , Ag или Au . Кроме того, кристаллы КРТ содержат собственные точечные дефекты — междоузельные атомы ртути Hg_I'' и ее вакансии V_{Hg}'' . Эти дефекты могут превращаться друг в друга в ходе таких реакций:



которым соответствуют законы действующих масс:

$$K_{rM}[M_I] = [Hg_I''] [M_{Hg}'];$$

$$K_{TM}[M_{Hg}'] = [V_{Hg}''] [M_I]; \quad (6)$$

$$[V_{Hg}''] [Hg_I''] = K_F''.$$

Здесь квадратные скобки обозначают концентрации соответствующих дефектов; K_{rM} , K_{TM} , K_F'' — константы равновесия, соответствующие реакциям (3)—(5); две из них независимые, а третья определена условием $K_{rM} K_{TM} = K_F''$.

Учитывая, что $[M_{Hg}'] + [M_I] = N_M$, где N_M — суммарная концентрация растворенного металла, из (6) получаем:

$$[M_I] = \frac{N_M K_{TM}}{[V_{Hg}''] + K_{TM}}, \quad [M_{Hg}'] = \frac{N_M [V_{Hg}'']}{[V_{Hg}''] + K_{TM}}. \quad (7)$$

Совершенно очевидно, что в условиях равновесия $[V_{Hg}''] \gg K_{TM}$ и $[Hg_I''] \ll K_{rM}$, поскольку известно, что в отожженных кристаллах КРТ элементы I группы проявляют себя преимущественно как акцепторы [25]. Однако в условиях ИТ концентрация Hg_I'' в области диффузии превышает 10^{12} см^{-3} при плотности тока ионов $j \sim 0,1 \text{ А/см}^2$ [7, 26], что намного больше предельного равновесного значения, достигаемого в условиях насыщения ртутью и равного $[Hg_I'']_{eq} \sim 10^6 \text{ см}^{-3}$ для КРТ ($x \sim 0,2$) при $T \approx 300 \text{ К}$ [27]. Может оказаться, что в условиях ИТ

$K_{rM} \ll [Hg_I'']$, и тогда из уравнений (7) следует, что в этой области должна происходить конверсия типа проводимости за счет реакций (3), (4).

Оценки показывают, что такое предположение вполне реальное. В самом деле, при низких температурах примеси I группы подвижны только в междоузлиях, поэтому в условиях, когда $[Hg_{Hg}] \ll K_{rM}$, их атомный (эмпирический) коэффициент диффузии равен

$$D_M = D_{MI} [Hg_I'']_{eq} / K_{rM}, \quad (8)$$

где D_{MI} — коэффициент прямой междоузельной диффузии.

Используя эмпирические данные [25, 28] для атомного коэффициента диффузии Cu и Ag и учитывая, что для коэффициента прямой междоузельной диффузии в КРТ энергия активации составляет величину $\sim 0,2 \text{ эВ}$, а частотный фактор равен $2,35 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$ [29], из соотношения (8) найдем, что $K_{rM} < 10^{12} \text{ см}^{-3}$ при $T \approx 300 \text{ К}$. Таким образом, рассмотренная модель предсказывает возможность конверсии легированных примесью I группы кристаллов узкощелевого КРТ. Отметим, что конверсия этого типа критична к плотности ионного тока и может наблюдаться только при достаточно больших ее значениях в отличие от конверсии вакансионно-легированного КРТ.

Сравнительные оценки скорости реакций (3) и (4) показывают, что диссоциативный механизм (4) не способен вызвать конверсию типа проводимости при ИЛТ, поскольку в области диффузии Hg_I'' при ИТ вакансии Hg отсутствуют [7]. Напротив, эстафетный механизм (3) вполне объясняет такую конверсию, если исходить из того, что $K_{rM} \ll [Hg_I'']$ в условиях ИТ. В самом деле, согласно теории квазихимической кинетики, изложенной в [30], характерное время конверсии путем преобразования M_{Hg}' в M_I по порядку величины равно $\tau_{rM} = 1/(k_{rM} [Hg_I''])$ и $\tau_{TM} = 1/(k_{TM} K_{TM})$ для реакций (3) и (4), соответственно. Здесь $k_{rM} = 4\pi r_{rr} D_I$; $k_{TM} = 4\pi r_{rr} D_{MI}$ — константы скорости прямых реакций (3) и (4), соответственно; $r_{rr} = 2e^2/(\epsilon_S k_B T)$; ϵ_S — статическая диэлектрическая проницаемость. Принимая, что в ходе ИТ концентрация Hg_I'' в диффузионном слое КРТ достигает $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и полагая $D_I \sim 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ [29], $r_{rr} \sim 10^{-6} \text{ см}$, найдем, что $\tau_{rM} \sim 10^{-2} \text{ с}$ при $T \sim 300 \text{ К}$, что существенно меньше длительности процесса ($\Delta t \sim 10^3 \text{ с}$). Напротив, учитывая, что $K_F'' \sim 10^9 \text{ см}^{-6}$ при $T \sim 300 \text{ К}$ [26], для τ_{TM} получим оценку: $\tau_{TM} \sim 10^{13} \text{ с} \gg \Delta t$.

Таким образом, глубокая конверсия типа проводимости легированных примесями I группы образцах КРТ при ИТ вполне вероятна и может осуществляться путем диффузии избыточной ртути в объем образца с последующим вытеснением примеси из узлов в междоузлия.

Если конверсию типа проводимости при ИТ легированных кристаллов КРТ удастся объяснить однозначно в рамках простейшей модели дефектной структуры легированных кристаллов КРТ, то о релаксации свойств *n*-слоя этого сказать нельзя.

На первый взгляд, после прекращения ИТ концентрация $Hg_i^{\cdot}$ в *n*-слое должна быстро уменьшаться из-за диффузии (характерное время этого процесса $d_n^2/D_i \sim 10$ с при $d_n \sim 10$ мкм). Это должно вызвать обратный переход примеси в узлы по реакциям (3), (4), как только будет выполнено условие $K_{rM}[M_i] \gg [M_{Hg}^{\cdot}][Hg_i^{\cdot}]$, с характерными временами τ_{rlx} для эстафетного механизма (3) и τ_{Trlx} — для диссоциативного механизма (4):

$$\tau_{rlx} = 1/(k_{rM}K_{rM}); \tau_{Trlx} = 1/(k_{TM}[V_{Hg}^{\cdot}]).$$

Видно, что $\tau_{rlx} \ll \tau_{Trlx}$, т. е. реакцией (4) и здесь можно пренебречь. Однако если принять такой механизм релаксации в качестве доминирующего процесса, то нельзя объяснить, почему не наблюдается обратная конверсия проводимости *n*-слоя в *p*-тип. Поэтому здесь обсуждаются также несколько других механизмов.

Во-первых, можно предположить, что на первом этапе релаксации (при изотермической выдержке) $d_n^2 \ll D_{M_i}\tau_{rlx}$, так что релаксация *n*-слоя хотя бы частично вызвана диффузией междоузельных примесных атомов M_i из слоя в объем кристалла. Действительно, в таких условиях вероятность перехода M_i в узлы решетки мала, и диффузия M_i происходит независимо от $M_{Hg}^{\cdot}$. По этой причине диффузионный поток M_i направлен в глубь кристалла (в сторону уменьшения градиента $[M_i]$), и конвертированный слой должен очищаться от примеси. Однако нетрудно заметить, в этом случае частотный множитель перед экспонентой в законе Аррениуса для τ_i должен быть на 5–6 порядков больше, чем в (1), а энергия активации — значительно меньше. Кроме того, закон такой релаксации не должен быть экспоненциальным, как это наблюдается в эксперименте (см. рис. 1), отсюда можно заключить, что данный механизм тоже маловероятен.

Другой возможный механизм релаксации связан с распадом раствора M_i . Возможность рас-

пада раствора обусловлена тем, что предельная растворимость M_i в равновесном КРТ, скорее всего, намного ниже 10^{16} см⁻³ из-за того, что $[M_i] \ll [M_{Hg}^{\cdot}] < 10^{17}$ см⁻³ в равновесии при 300 К [25, 28]. При этом в конвертированном слое распад должен происходить с особенно высокой скоростью, поскольку здесь $[M_i] \gg [M_{Hg}^{\cdot}]$ и доминирует быстрая прямая междоузельная диффузия. Тип остаточной проводимости конвертированного слоя в этой ситуации будет определяться основными фоновыми примесями, т. е. донорами, что также не противоречит эксперименту. В самом деле, из-за распада раствора концентрация M_i в конвертированном слое сильно понижается, поэтому скорость образования $M_{Hg}^{\cdot}$ тоже оказывается малой, и реконверсии не наблюдается. С другой стороны, в объеме образца концентрация раствора намного ниже насыщенной, поэтому там $[M_i]$ раствор стабилен. Следовательно, некоторое время после конверсии поток M_i будет направлен из конвертированного слоя внутрь кристалла, что также не способствует реконверсии. С течением времени включения должны раствориться в результате перехода M_i в $M_{Hg}^{\cdot}$, и тогда реконверсия станет возможной.

Еще один механизм релаксации, который, скорее всего, проявляется при изохронном отжиге ИТ-структур, связан с равновесной атомной диффузией примесных атомов (вероятно, из объема образца в конвертированный слой). В пользу этого предположения свидетельствует совпадение энергии активации постоянной времени τ (2) с энергией активации атомного коэффициента диффузии, по крайней мере, для меди.

Заключение

Впервые экспериментально достоверно подтвержден факт существования глубинной *p-n*-конверсии типа проводимости в легированных элементами I группы Cu, Ag или Au монокристаллах узкощелевого $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0,21-0,23$) при ионном травлении. Предложен общий для всех указанных примесей механизм конверсии, связанный со сверхбыстрой диффузией междоузельной ртути из поверхностного источника чрезвычайно большой концентрации, образуемого при ИТ, и вытеснением ею примесных атомов из катионной подрешетки (где они играют роль акцепторов) в междоузлия (где они играют роль доноров). Получено необходимое условие осуществления такой конверсии. Показано, что дефектная структура конвертированно-

го слоя нестабильна, поэтому его проводимость быстро релаксирует, после чего она определяется, главным образом, неконтролируемыми донорами. Определены характерные времена релаксации. Обсуждаются возможные механизмы отсутствия обратной реконверсии конвертированного слоя из n в p -тип.

Литература

1. *Wotherspoon J. T. M.* // UK Pat. GB 2095898, 1981.
2. *Baker I. M., Maxey C. D.* // J. Electron. Mater. 2001. V. 30. P. 682.
3. *Пономаренко В. П.* // УФН. 2003. Т. 173. № 6. С. 649.
4. *Мынбаев К. Д., Иванов-Омский В. И.* // ФТП. 2003. Т. 37. № 10. С. 1153.
5. *Иванов-Омский В. И., Миронов К. Е., Мынбаев К. Д.* // Там же. 1990. Т. 24. № 12. С. 2222.
6. *Savitsky V., Mansurov L., Fodchuk I., Izhnin I., Virt I., Lozynska M., Evdokimenko A.* // Proc. SPIE. 1998. V. 3725. P. 299.
7. *Богоболящий В. В., Ижнин И. И.* // Известия вузов. Сер. Физика. 2000. Т. 43. № 8. С. 16. (Russ. Phys. J. 2000. V. 43. № 8. P. 627.)
8. *Ivanov-Omskii V. I., Mironov K. E., Mynbaev K. D.* // Semicond. Sci. Technol. 1993. V. 8. № 5. P. 634.
9. *Izhnin I. I., Izhnin A. I., Kurbanov K. R., Prytuljak B. B.* // Proc. SPIE. 1996. V. 3182. P. 383.
10. *Bogoboyashchy V. V., Dvoretzky S. A., Izhnin I. I., Mikhailov N. N., Sidorov Yu. G., Sizov F. F., Varavin V. S., Yudenkov V. A.* // Phys. Stat. Sol. (c). 2004. V. 1. № 2. P. 355.
11. *Богоболящий В. В., Ижнин И. И.* // Прикладная физика. 2003. № 6. С. 120.
12. *Smith E. P. G., Siliquini J. F., Musca C. A., Antoszewski J., Dell J. M., Faraone L., Piotrowski J.* // J. Appl. Phys. 1998. V. 83. № 10. P. 5555.
13. *Siliquini J. F., Dell J. M., Musca C. A., Faraone L., Piotrowski J.* // J. Cryst. Growth. 1998. V. 184/185. P. 1219.
14. *Berchenko N. N., Bogoboyashchy V. V., Izhnin I. I., Vlasov A. P.* // Phys. Stat. Sol.(b). 2002. V. 229. № 1. P. 279.
15. *Berchenko N. N., Bogoboyashchy V. V., Vlasov A. P., Izhnin I. I., Ilyina Yu. S.* // Surface and Coatings Technol. 2002. Vol. 158/159. P. 732.
16. *Богоболящий В. В., Власов А. П., Ижнин И. И.* // Известия вузов. Сер. Физика. 2001. Т. 44. № 1. С. 50. (Russ. Phys. J. 2001. V. 44. № 1. P. 61).
17. *Antoszewski J., Musca C. A., Dell J. M., Faraone L.* // J. Electr. Mater. 2000. V. 29. № 6. P. 837.
18. *Берченко М. М., Богоболящий В. В., Власов А. П., Ижнин И. И., Яковина В. С.* // Вестник Национального университета "Львовская политехника". Сер. Электроника. 2002. № 459. С. 18.
19. *Izhnin I. I., Bogoboyashchy V. V., Berchenko N. N., Yudenkov V. A.* // J. Alloys and Comp. 2003. V. 371. № 1—2. P. 122.
20. *Богоболящий В. В., Елизаров А. И., Ижнин И. И.* // Вестник Кременчугского госуд. политех. ун-та. 2003. Вып. 5. С. 131.
21. *Belas E., Grill R., Franc J., Moravec P., Vorghova R., Höschl P., Sitter H., Toth A. L.* // J. Cryst. Growth. 2001. V. 224. P. 52.
22. *Belas E., Bogoboyashchy V. V., Grill R., Izhnin I. I., Vlasov A. P., Yudenkov V. A.* // J. Electron. Mater. 2003. V. 32. № 7. P. 698.
23. *Богоболящий В. В., Ижнин И. И., Сизов Ф. Ф.* // Доклады НАН Украины. 2004. № 4. С. 70.
24. *Beck W. A., Anderson J. R.* // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. P. 541.
25. *Заитов Ф. А., Исаев Ф. К., Горишков А. В.* Дефектообразование и диффузионные процессы в некоторых полупроводниковых твердых растворах. — Баку: Азернешр, 1984.
26. *Shaw D., Capper P.* // J. Mater. Sci.: Materials in Electronics. 2000. V. 11. P. 169.
27. *Bogoboyashchy V. V., Kurbanov K. R.* // J. Alloys and Comp. 2004. V. 371. № 1—2. P. 97.
28. *Богоболящий В. В., Елизаров А. И., Петряков В. А., Стафеев В. И., Северцев В. Н.* // ФТП. 1987. Т. 21. С. 1469.
29. *Holander-Gleixner S., Robinson H. G., Helms C. R.* // J. Appl. Phys. 1998. V. 83. P. 1299.
30. *Kröger F. A.* The Chemistry of Imperfect Crystals. — North Holland, 1974.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2004 г.

Type of conductivity conversion in $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ single crystal doped with I group dopants under ion milling

V. V. Bogoboyashchy

Kremenchuk State Polytechnical University, Kremenchuk, Ukraine

I. I. Izhnin

R&D Institute for Materials Scientific Research Company "Carat", Lviv, Ukraine

K. R. Kurbanov

Institute of Economy and New Technology, Kremenchuk, Ukraine

The existence of deep (10–30 μm) p - n -type conductivity conversion in single crystal p - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ doped with Cu, Ag or Au under ion milling has been experimentally proved. We propose the conversion mechanism based on the replacement of the dopant atoms from cation positions to the interstitials. This process takes place during the diffusion of the interstitial Hg appearing under ion milling. It has been shown that such donor centers are unstable. And so after relaxation the conductivity in the converted layer depends on the residual donors. Plausible reasons of the absence of the full reconversion from n into initial p -type have been examined.