

06

## Модификация электрических свойств вакансионно-легированных образцов $p$ -HgCdTe при ионном травлении

© И.И. Ижнин, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, Ю.Г. Сидоров,  
В.С. Варавин, М. Поцяск, К.Д. Мынбаев

НИИ материалов «НПП „Гранат“», 79031 Львов, Украина  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия  
Институт физики Университета Жешув, 35-310 Жешув, Польша  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: granat@ipm.lviv.ua

Поступило в Редакцию 23 марта 2008 г.

Изучено воздействие ионного травления на электрические свойства вакансионно-легированных образцов  $p$ -Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te ( $x \sim 0.22$ ). Образцы были изготовлены термическим отжигом гетероструктур, выращенных молекулярно-пучковой эпитаксией, а также монокристаллов и пленки, выращенной жидкофазной эпитаксией. После ионного травления в образцах наблюдалось образование донорных центров, причем в гетероструктурах, в отличие от других образцов, концентрация центров достигала величины  $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Установлено, что причиной высокой концентрации донорных центров в гетероструктурах явилась активация ионным травлением нейтральных дефектов, сформировавшихся в процессе роста. Обсуждается возможная природа этих дефектов.

PACS: 73.61.Ga, 61.80.Jh, 66.30.Lw

В современной технологии приборов на основе твердых растворов Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te (КРТ) для изготовления  $p$ - $n$ -переходов в вакансионно- и примесно-легированном материале широко используется ионное травление [1,2]. Недавно мы сообщали о результатах ионного травления выращенных молекулярно-пучковой эпитаксией (МПЭ) гетероструктур КРТ  $p$ -типа проводимости, легированных мышьяком [3]. Было обнаружено, что ионное травление таких образцов приводит к конверсии типа проводимости и формированию  $n^+$ - $n$ -структур с концентрацией

доноров в  $n$ -области непосредственно после травления  $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Это значение оказалось на порядок выше, чем концентрация донорных центров, которые могли образоваться в результате взаимодействия атомов междоузельной ртути ( $\text{Hg}_I$ ), генерируемых при ионном травлении, с атомами As, как это предполагает известный механизм конверсии [4,5].

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния ионного травления на электрические свойства МПЭ-гетероструктур КРТ,  $p$ -тип проводимости которых определялся собственными дефектами — вакансиями ртути (вакансионно-легированных). Для сравнения в работе приводятся результаты аналогичных исследований, выполненных на объемных монокристаллах и пленке, выращенной жидкофазной эпитаксией.

Гетероэпитаксиальные структуры (образцы #1, 2) были выращены на подложках CdTe/ZnTe/GaAs в Институте физики полупроводников СО РАН [6]. Структура образцов, толщина слоев и состав „активного“ слоя КРТ ( $x \sim 0.22$ ) были такими же, как у образцов, описанных в работе [3]. Образец #3 представлял собой эпитаксиальную пленку, выращенную жидкофазной эпитаксией из раствора, обогащенного теллуром, на подложке CdZnTe, а образцы #4 и #5 — пластины, вырезанные из слитков КРТ, выращенных направленной кристаллизацией с подпиткой из твердой фазы. Образец #5 был в процессе роста легирован Se ( $\sim 1 \text{ at.}\%$ ). Образцы #3–5 были выращены на ОАО „Чистые металлы“ (Светловодск, Украина).

Параметры образцов после выращивания и ионного травления определялись путем измерения коэффициента Холла  $R_H$  и проводимости  $\sigma$  при температуре  $T = 77 \text{ К}$  в диапазоне магнитных полей  $B = 0.01–1.5 \text{ Т}$ . Полученные зависимости  $R_H(B)$  и  $\sigma(B)$  анализировались с использованием метода дискретного анализа спектров подвижности (DMSA) [7].

Непосредственно после процесса МПЭ гетероструктуры имели  $n$ -тип проводимости с концентрацией электронов в „активном“ слое  $n_{77} \sim 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и их подвижностью  $\mu_{n77} \sim 10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . После термического отжига в атмосфере гелия при температуре  $210^\circ \text{С}$  в течение 24 h эти образцы имели  $p$ -тип проводимости, определявшийся вакансиями ртути  $V_{\text{Hg}}$ . Концентрация и подвижность дырок в „активном“ слое образцов составляли  $p_{77} \sim (8–10) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $\mu_{p77} \sim 500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Пленка, выращенная жидкофазной эпитаксией, и объемные кристаллы после роста имели  $p$ -тип проводимости с концен-

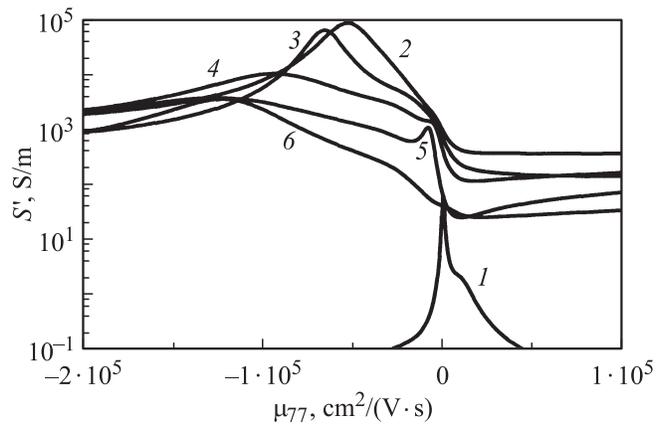
**Таблица 1.** Параметры образцов  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  после термического отжига и ионного травления

Образец	#1	#2	#3	#4	#5
$x$	0.223	0.224	0.22	0.28	0.215
$d, \mu\text{m}$	10.1	10.8	18.8	815	990
После отжига					
$p_{77}, \text{cm}^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{16}$	$8.3 \cdot 10^{15}$	$1.6 \cdot 10^{16}$	$1.3 \cdot 10^{16}$	$3.4 \cdot 10^{15}$
$\mu_{p77}, \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$	500	480	510	380	420
После ионного травления					
$n_{77}, \text{cm}^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{17}$	$1.1 \cdot 10^{17}$	$2.3 \cdot 10^{16}$	$2.6 \cdot 10^{16}$	$1.3 \cdot 10^{15}$
$\mu_{n77}, \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$	48000	53000	92000	25000	110000

трацией вакансий  $[V_{\text{Hg}}] > 10^{17} \text{cm}^{-3}$ . Для уменьшения  $[V_{\text{Hg}}]$  эти образцы были подвергнуты термическому отжигу в парах ртути. Параметры образцов после отжига представлены в табл. 1, где  $d$  — толщина слоя КРТ.

Ионное травление проводили ионами  $\text{Ar}^+$  на установке ИВ-3 фирмы ЕИКО (Япония). Энергия ионов составляла 500 eV, плотность тока —  $0.1 \text{mA}/\text{cm}^2$ , время процесса — 20 min. Долговременное изменение (релаксация) параметров образцов после ионного травления исследовалось при их выдержке при 300 К.

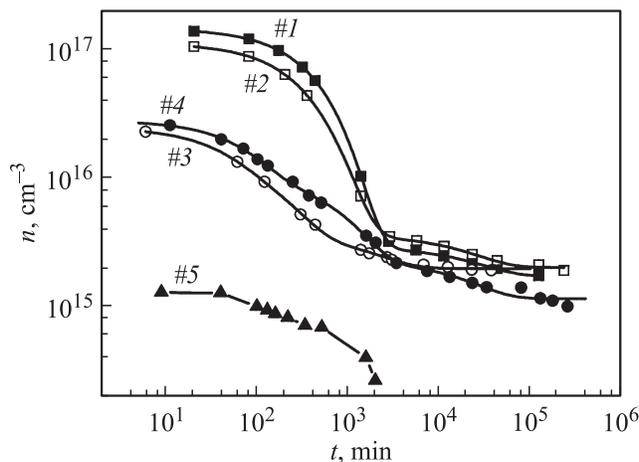
Во всех подвергнутых ионному травлению образцах образовался конвертированный слой  $n$ -типа проводимости. Этот слой имел типичную для последствий ионной обработки  $n^+$ - $n$ -структуру [3] с радиационно-нарушенным  $n^+$ -„поверхностным“ слоем толщиной  $\sim 2 \mu\text{m}$  и „объемным“  $n$ -слоем. В процессе хранения образцов при комнатной температуре мы наблюдали существенные изменения значений  $R_H$  и  $\sigma$ . На рис. 1 представлены изменения огибающей спектров подвижности для образца #2. Видно, что до ионного травления (кривая 1) проводимость образца  $S'$  определялась легкими и тяжелыми дырками. После травления в спектре подвижности доминировали пики от электронов с высокой подвижностью, что можно связать



**Рис. 1.** Огибающие спектров подвижности при  $T = 77$  К для образца #2: 1 — после отжига, 2–5 — после ионного травления и выдержки при комнатной температуре в течение соответственно 20 (2), 200 (3), 1380 (4) и 231 600 min (5). Кривая 6 получена после удаления химическим травлением поверхностного слоя толщиной  $0.7 \mu\text{m}$ .

с образованием „объемного“  $n$ -слоя (кривая 2). По мере старения (кривые 3–5) подвижность этих электронов увеличивалась, однако их вклад в проводимость уменьшался, так что на спектрах стал проявляться вклад электронов с низкой подвижностью, которые можно было приписать радиационно-нарушенному „поверхностному“  $n^+$ -слою. На определенной переходной стадии (кривая 5) вклад в проводимость электронов с низкой подвижностью стал сопоставим с вкладом электронов с высокой подвижностью. После того как химическим травлением с поверхности образца был удален радиационно-нарушенный слой толщиной  $0.7 \mu\text{m}$  (кривая 6), в спектре вновь стали доминировать электроны с высокой подвижностью. Это означало, что эти электроны принадлежали образовавшемуся в ходе ионного травления „объемному“ конвертированному  $n$ -слою.

Значения  $n_{77}$  и  $\mu_{n77}$  в „объемном“ конвертированном слое для всех образцов, полученные с помощью DMSA по результатам измерений, проведенных непосредственно после ионного травления, представлены в табл. 1. Видно, что величина  $n_{77}$  в образцах, выращенных МПЭ,



**Рис. 2.** Релаксация концентрации электронов, измеренной при 77 К, в „объемном“ конвертированном слое образцов #1–5 после ионного травления. Образцы хранились между измерениями при комнатной температуре.

оказалась на уровне  $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . В нелегированных монокристаллах и пленке, выращенной жидкофазной эпитаксией, значение  $n_{77}$  было в пять раз меньше ( $\sim 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ). В образце, легированном Se, оно было еще меньше ( $\sim 1.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ).

На рис. 2 показана релаксация величины  $n_{77}$  „объемного“ конвертированного слоя после ионного травления. Зависимость  $n_{77}$  от времени выдержки для всех образцов была экспоненциальной и имела три стадии с различными характеристическими временами  $\tau_i$ , за исключением образца #5, где после 1000 min вклад электронов в проводимость „объемного“ конвертированного слоя стал пренебрежимо мал. Параметры подгонки релаксационных кривых для образцов #2, 3 и 4 представлены в табл. 2, сами кривые представлены на рис. 2 сплошными линиями. Уменьшение  $n_{77}$  при выдержке для всех образцов не приводило к ре-конверсии в *p*-тип.

В соответствии с существующей концепцией [8], релаксация  $n_{77}$  в вакансионно-легированных образцах КРТ, подвергнутых ионному травлению, вызвана распадом донорных центров, образованных в ходе травления в результате взаимодействия  $\text{Hg}_I$  с остаточными акцепторами I

Таблица 2. Параметры аппроксимации кривых релаксации

Образец	#2	#3	#4
$N_1, \text{cm}^{-3}$ $\tau_1, \text{min}$	$3.5 \cdot 10^{16}$ 200	$1.2 \cdot 10^{16}$ 40	$1.8 \cdot 10^{16}$ 75
$N_2, \text{cm}^{-3}$ $\tau_2, \text{min}$	$7.4 \cdot 10^{16}$ 450	$9.5 \cdot 10^{15}$ 200	$7.7 \cdot 10^{15}$ 900
$N_3, \text{cm}^{-3}$ $\tau_3, \text{min}$	$1.5 \cdot 10^{15}$ 22000	$1.5 \cdot 10^{15}$ 20000	$1.1 \cdot 10^{15}$ 22000
$N_0, \text{cm}^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{15}$	$2.0 \cdot 10^{15}$	$1.2 \cdot 10^{15}$

и V групп периодической системы. Непосредственно после травления величина  $n_{77}$  в этом случае должна быть равна суммарной концентрации остаточных примесей  $N_r = N_A + N_D$  в образце (и доноров, и акцепторов). Действительно, значения  $n_{77}$  в табл. 1 для монокристаллов и пленки, выращенной жидкофазной эпитаксией, находятся в разумном согласии с оценками величин  $N_r$  в таких образцах, имеющимися в литературе [9,10]. Еще более низкая величина  $n_{77}$  в образце, легированном Se, объясняется тем, что введение данного элемента в КРТ снижает величину  $N_r$  [11].

В образцах, выращенных МПЭ, величина  $n_{77}$  непосредственно после ионного травления оказалась на 1–2 порядка величины больше, чем известное для них значение  $N_r$ . Поскольку непосредственно после выращивания в этих образцах наблюдалась высокая подвижность электронов, трудно допустить, что данные образцы были сильно компенсированы. Поэтому величина  $n_{77} \sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$  не может быть объяснена исключительно реакцией атомов  $\text{Hg}_I$  с атомами электрически активных примесей. Аналогично случаю с образцами, легированными As [3], можно предположить, что и в вакансионно-легированных гетероструктурах донорные центры с концентрацией  $\sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$  образовались в результате взаимодействия  $\text{Hg}_I$  с некоторыми исходно нейтральными дефектами. Поскольку в настоящей работе исследовались нелегированные образцы, а условия отжига (вакансионного легирования) существенно отличались от условий активационного отжига для As в [3], можно утверждать, что выявленные ионным травлением дефекты в МПЭ-

гетероструктурах формировались не на стадии отжига, а на стадии роста. Очевидно, что эти дефекты оставались нейтральными в процессе отжига и были выявлены только ионной обработкой. В работе [3] было предположено, что эти дефекты могут быть связаны с атомами Те, и устойчивость к отжигу подобных дефектов в гетероструктурах КРТ, выращенных МПЭ, была показана ранее [6]. Возможно также, что такие термически стабильные дефекты могут быть комплексами [12] или атомами электрически нейтральных примесей. Исследования природы данных дефектов продолжаются.

В заключение, для конвертированных ионным травлением в  $n$ -тип вакансионно-легированных гетероэпитаксиальных структур  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , выращенных молекулярно-пучковой эпитаксией, оказалась характерна высокая концентрация электронов ( $n_{77} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ). Это значение близко к величине  $n_{77}$  в подвергнутых такой же обработке МПЭ-гетероструктурах, легированных мышьяком, и существенно превышает  $n_{77}$  в обработанных ионами образцах КРТ, выращенных другими методами. Полученные результаты подтверждают присутствие в МПЭ-гетероструктурах нейтральных дефектов. На основании представленных в работе данных можно утверждать, что эти дефекты, впервые обнаруженные в структурах, легированных As, не связаны с процессом высокотемпературной активации мышьяка, а образовались на стадии роста. Полученные результаты подтверждают, что ионная обработка может служить эффективным инструментом для изучения дефектной структуры  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ .

Работа была частично поддержана Министерством образования и науки Украины (Договор № М/182-2007), грантом РФФИ 07-02-00400 и Интеграционным проектом СО РАН № 3.20.

## Список литературы

- [1] Пономаренко В.П. // УФН. 2003. Т. 173. С. 649.
- [2] Shaw D., Capper P. // J. Mater. Sci.: Mater. Electr. **19**, 965 (2008).
- [3] Izhnin I.I., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov Yu.G., Varavin V.S., Mynbaev K.D., Pociask M. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. Art. 132 106.
- [4] Богоболяций В.В., Власов А.П., Ижнин И.И. // Изв. вузов. Физика. 2001. Т. 44. С. 50.

- [5] *Belas E., Grill R., Franc J., Moravec P., Varghová R., Höschl P., Sitter H., Toth A.L.* // *J. Cryst. Growth*. 2001. V. 224. P. 52.
- [6] *Сидоров Ю.Г., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Якушев М.В., Сабина И.В.* // *ФТП*. 2001. Т. 35. С. 1092.
- [7] *Vogoboyashchii V.V., Elizarov A.I., Izhnin I.I.* // *Semicond. Sci. Technol.* 2005. V. 20. P. 726.
- [8] *Izhnin I.I., Vogoboyashchyy V.V., Sisov F.F.* // *Proceed. SPIE*. 2005. V. 5881. Art. 5881OU–1.
- [9] *Богобоящий В.В., Курбанов К.Р., Оксанич А.П.* // *Функц. материалы*. 2000. Т. 7. С. 546.
- [10] *Богобоящий В.В.* // *ФТП*. 2002. Т. 36. С. 1418.
- [11] *Богобоящий В.В., Ижнин И.И., Курбанов К.Р.* // *Патент Украины UA 5447*. 2003.
- [12] *Young M.L., Giess J.* // *J. Appl. Phys.* 1991. V. 69. P. 7173.