

УДК: 621.315.592

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ, Н.Х. ТАЛИПОВ

**МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГЛУБОКИХ
КОНВЕРТИРОВАННЫХ СЛОЕВ В $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ПРИ
ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ¹**

В работе предложена модель *in-situ* формирования n^+n^-p структуры в $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при имплантации легких ионов V^+ и проведена экспериментальная проверка модели.

Ключевые слова: CdHgTe , гетероэпитаксиальные слои, радиационные дефекты, ионная имплантация.

Ионная имплантация является основным методом формирования $n-p$ переходов при создании широкоформатных матричных фотоприемников на основе гетероэпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) p -типа. В зависимости от массы внедряемых ионов и режимов имплантации, в p -КРТ могут формироваться либо резкие n^+p -переходы, либо n^+n^-p -структуры, последние из которых предпочтительнее с целью создания фотоприемников с высокими параметрами [1, 2]. Существующие модели формирования только сильнолегированных приповерхностных n^+ -слоев при ионной имплантации [3] не объясняют причину образования глубокого n^- -слоя в n^+n^-p -структуре. В работе рассматривается модель *in-situ* формирования n^+n^-p -структур в p -КРТ при имплантации легких ионов V^+ , а также ее экспериментальное подтверждение.

За основу модели формирования n^+n^-p -структуры при ионной имплантации p -КРТ, представленной на рис. 1, принята так называемая модель “Bubulac” [4, 5], в которой образование глубокого n^- -слоя при постимплантационных отжигах объясняется термической диффузией смещенных атомов ртути из ионно-имплантированной области, компенсирующих собственные вакансии. Однако в работах [4, 5], не рассматриваются процессы *in-situ* формирования n^+n^-p -структур при ионной имплантации и нет прямых экспериментальных доказательств того, что именно атомы ртути диффундируют в объем кристалла. Косвенным подтверждением этой гипотезы являются полученные нами результаты по сильной зависимости глубины n^- -слоя и концентрации донорных центров в n^+ -слое от состава поверхности гетероэпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [6], то есть от количества атомов ртути в верхнем варизонном слое, в котором тормозятся внедряемые ионы и генерируются радиационные дефекты.

Формирование n^+n^-p структуры при ионной имплантации легких ионов V^+ , на наш взгляд, это сложный многоступенчатый процесс, который осуществляется в несколько этапов, когда соотношение каналов образования активных доноров и нейтральных стоков меняется по глубине и зависит от общей дефектной ситуации, трансформирующейся в процессе ионной имплантации (см. рис. 1): (1) образование малоподвижных сложных донорных примесно-дефектных комплексов в области проецированного пробега ионов (R_p) на ранних стадиях имплантации, причем чем больше масса ионов, тем крупнее дефекты; (2) с увеличением до-

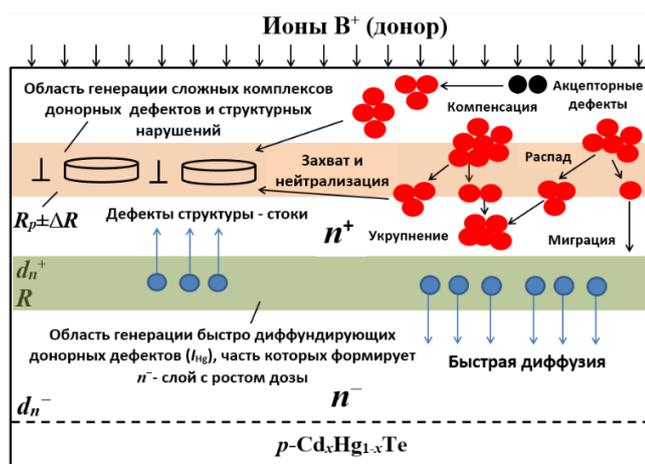


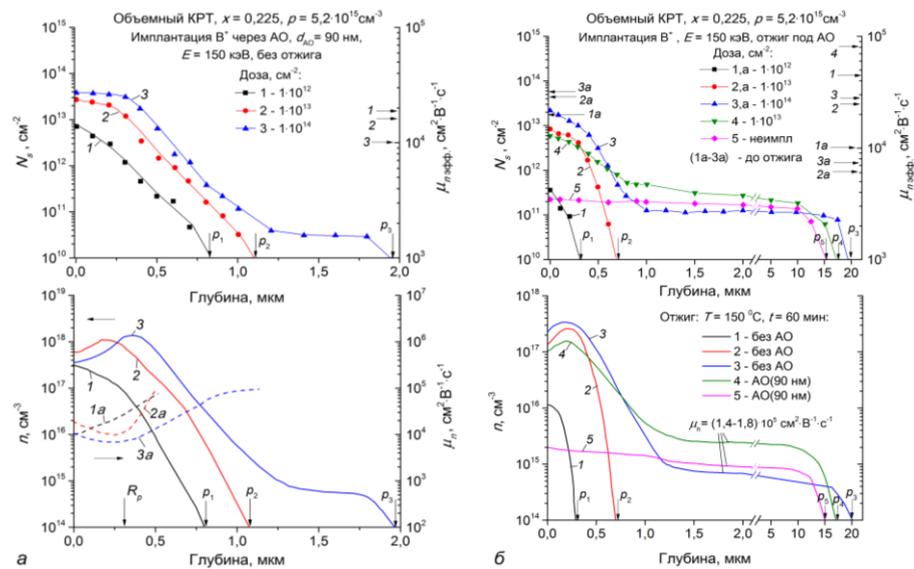
Рис. 1. Модель *in situ* формирования n^+n^-p структуры в процессе имплантации легких ионов V^+ в КРТ p -типа.

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания № 16.1032.2014/К.

зы происходит распад части сложных примесно-дефектных комплексов на более простые дефекты донорного типа, которые способны мигрировать в глубь кристалла до последующего их захвата на стоки, либо укрупнения; (3) нейтрализация части сложных комплексов донорных дефектов при накоплении структурных несоответствий вблизи поверхности, а также их компенсация дефектами акцепторного типа; (4) формирование крупных структурных нарушений в объеме кристалла в области максимального энерговыделения при больших дозах, которые захватывают и нейтрализуют успевшие мигрировать туда дефекты (или комплексы дефектов) донорного типа; (5) преимущественное образование на конце полного пробега ионов (R), где отсутствуют крупные структурные нарушения – стоки, как малоподвижных примесно-дефектных комплексов донорного типа, формирующих границу n^+ -слоя (d_n^+), так и быстро диффундирующих точечных донорных дефектов – междоузельных атомов ртути (I_{Hg}), часть из которых, не захваченных на стоки, с ростом дозы, превышающей дозу насыщения слоевой концентрации электронов, формируют в объеме кристалла n^- -слой (d_n^-); (6) формирование n^- -слоя происходит только в случае имплантации легких ионов, когда ионизационные потери энергии ионов превышают ядерные, и активационным процессом миграции подвижных донорных дефектов является сильное возбуждение электронной подсистемы кристалла.

Подтверждением того, что за формирование глубокого n^- -слоя ответственны не захваченные на стоки быстро диффундирующие междоузельные атомы Hg, являются описанные в работе [1] эксперименты как по ионной имплантации в объемные кристаллы р-КРТ легких V^+ и тяжелых ионов Xe^+ , так и по ионной имплантации V^+ и ионно-лучевому травлению Ag^+ ГЭС КРТ МЛЭ, а также представленные на рис. 2 результаты эксперимента ионной имплантации V^+ и отжига под анодным окислом (АО) в которых пленка АО является диффузионным источником атомов Hg [7]).

Рис. 2. Распределение по глубине слоевой концентрации N_s , концентрации электронов n и подвижности электронов μ_n в объемном КРТ p -типа), неимплантированном (б, кривая 5) и имплантированном ионами V^+ с энергией 150 кэВ различными дозами. Условия отжига: а – без отжига; б – (1а–3а) – N_s до отжига, (1–5) отжиг $T = 150^\circ C$, $t = 60$ мин без покрытия (1–3) и под АО (4, 5). μ_n эфф. – эффективная подвижность электронов. R_p – проецированный пробег. p_1 – p_5 – глубина n -слоя.



Данные, приведенные на рис. 2, а, показывают, что при дозе $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ сформировалась n^+n^- структура, в которой n - p переход располагается на глубине 2 мкм. Части от этого же исходного образа, предназначенные для отжига, имплантировались ионами V^+ с $E = 150 \text{ кэВ}$ и $D = 1 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ без какой-либо маски. Для одной дозы $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ постимплантационный отжиг проводился как без покрытия, так и под анодным окислом (рис. 2, б). Как было рассмотрено в [11], и как мы ожидали, что предварительно созданный ионной бомбардировкой нарушенный слой должен захватывать подвижные междоузельные атомы ртути (I_{Hg}), генерируемые при отжиге под анодным окислом имплантированного образца, поэтому диффузии ртути с поверхности в объем не должно было происходить. Однако при дозе $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ионов V^+ , внедренных через АО, количества созданных дефектов-стоков оказалось недостаточно, чтобы воспрепятствовать диффузии ртути, поэтому глубина n^- -слоя в этом случае оказалось почти такая же ($d_n = 17 \text{ мкм}$, кривая 4 на рис. 2, б), как и при отжиге под АО неимплантированного образца ($d_n = 15 \text{ мкм}$, кривая 5 на рис. 2, б). То, что диффузия ртути происходит именно за счет наличия анодного окисла, а не из нарушенного слоя, видно из данных по отжигу непокрытого образца, имплантированного такой же дозой $1 \cdot 10^{13}$

см^{-2} (рис. 2, б, кривая 2). Формирование n^- -слоя при этом не произошло, так же, как и в случае маленькой дозы ионов B^+ $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (рис. 2, б, кривая 1). Напротив, отжиг непокрытого p -КРТ, имплантированного большой дозой $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, привел к образованию n^+n^-p структуры, в которой n^- -слой имеет глубину 20 мкм (на рис. 2, б, кривая 3). Если учесть, что его исходная глубина составляла 2 мкм (кривая 3 на рис. 2, а), то рост глубины в результате отжига составил 18 мкм. Как видно, эта величина близка к данным по глубине n^- -слоя, полученного в случае отжига под АО имплантированного дозой $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и неимплантированного КРТ. Поскольку условия отжига везде были одинаковые то из полученных данных можно, на наш взгляд, заключить, что образование n^- -слоя при постимплантационном отжиге идет за счет диффузии ртути, источником которой является поверхностный слой, нарушенный ионной бомбардировкой. Количество свободной ртути, способной диффундировать в глубь КРТ, в данном источнике существенно зависит от дозы внедряемых ионов. В случае небольших доз ($D \leq 10^{13} \text{ см}^{-2}$) ее количества недостаточно для формирования n^- -слоя как в процессе самой имплантации, так и при последующем отжиге. Поэтому с целью создания n^+n^-p структур необходимо внедрять больше дозы ($D > 10^{13} \text{ см}^{-2}$) ионов B^+ , при которых незахваченные на стоки I_{Hg} мигрируют в объем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войцеховский А. В., Талипов Н. Х. // Изв. вузов. Матер. электр. техн. – 2011. – № 4. – С. 32–41.
2. Овсяк В. Н., Курышев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона / Под. ред. С. П. Синицы. – Новосибирск: Наука, 2001. – Глава. 3. – С. 179–241.
3. Войцеховский А. В., Григорьев Д. В., Талипов Н. Х. // Известия вузов. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 10. – С. 5–18.
4. Bubulac L. O., Tennant W. E., Lo D. S. et all // J. Vac. Sci. Technol. – 1987. – V. A5. – No. 5. – P. 3166–3170.
5. Bubulac L. O. // J. Cryst. Growth. – 1988. – V. 86. – P. 723–734.
6. Талипов Н. Х., Войцеховский А. В., Григорьев Д. В. // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 3. – С. 54–67.
7. Талипов Н. Х., Попов В. П. Ремесник В. Г. и др. // ФТП. 1992. – Т. 26. – В. 2. – С. 310–317.

Национальный исследовательский
 Томский государственный университет, г. Томск, Россия
 E-mail: vav43@mail.tsu.ru, niyazt@yandex.ru.

Войцеховский Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой;
 Талипов Нияз Хатимович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник.

A. V. VOITSEKHOVSKII, N. KH. TALIPOV

MODEL REPRESENTATIONS OF THE DEEP CONVERTED LAYERS FORMATION IN ION-IMPLANTED $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

The model of *in-situ* formation of n^+n^-p -structures in $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ by implantation of light B^+ ions is proposed and the experimental examination of model is carried out.

Keywords: CdHgTe , heteroepitaxial layers, radiation defects, ion implantation

1. Voitsekhovskii A. V., Talipov N. Kh. Ionnaya implantatsiya v geteroepitakcialnii sloi i kristalli $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, *Izvestiya vuzov. Materiali elektronnoy tekhniki*, 2011, no. 4, pp. 32–41. (In Russ.)
2. Ovsyuk V. N., Kurishev G. L., Sidorov Yu. G. et all., *Matrichnie fotopriemnie ustroystva in-frakrasnogo diapazona*, Pod red. S. P. Sinitci, Novosibirsk, Nauka, 2001, Glava 3, pp. 179–241. (In Russ.)
3. Voitsekhovskii A. V., Grigor'ev D. V., Talipov N. Kh., Ionnaya implantatsiya v geteroepitakcialnii CdHgTe , virashennii metodom moleculyarno-luchevoi epitaksii, *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2008, vol. 51, no. 10, pp. 5–19. (In Russ.)
4. Bubulac L. O., Tennant W. E., Lo D. S. et all, Ion implanted junction formation in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1987, vol. A5, no. 5, pp. 3166–3170.
5. Bubulac L. O., Defects, diffusion and activation in ion implanted HgCdTe , *J. Cryst. Growth.*, 1988, vol. 86, pp. 723–734.

6. Talipov N. Kh., Voitsekhovskii A. V., Grigor'ev D. V., Vliyanie sostava verhnego varizonnogo sloya na formirovanie n^+-n^-p -struktur implantirovannih borom geteroepitakcialnih sloyah $Cd_xHg_{1-x}Te$, *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2014, vol. 57, no. 3, pp. 54–67. (In Russ.)
7. Talipov N.K., Popov V. P., Remesnik V. G., et al, Vliyanie otghiga pod anodnim okislom na izmenenie sostava poverhnosti i konverciyu tipa provodimosti monokristallov $p-Cd_xHg_{1-x}Te$, *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 1992, vol. 26, no. 2, pp. 310–317. (In Russ.)

National Research Tomsk State University, Tomsk. Russia.

E-mail: vav43@mail.tsu.ru, niyazt@yandex.ru.

Voitsekhovskii Aleksandr Vasilyevich, Prof., Dr. Sc.;

Talipov Niyaz Khatimovich, Senior researcher, PhD.