

## РАДИАЦИОННОЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В КРИСТАЛЛАХ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ВОДОРОДА С ЭНЕРГИЕЙ 10 МэВ

© А.В.Войцеховский, А.Г.Коротаев, А.П.Козаненко

Сибирский физико-технический институт при Томском государственном университете,  
634050 Томск, Россия  
(Получена 11 мая 1994 г. Принята к печати 2 октября 1995 г.)

Проведено исследование процесса радиационного дефектообразования в кристаллах  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0.3$ ) при облучении протонами с энергией 10 МэВ дозами до  $10^{15} \text{ см}^{-2}$  при комнатной температуре. Определены профили распределения электрически активных дефектов. Дефекты вакансионного типа изучались при помощи метода позитронной аннигиляции.

Радиационное дефектообразование в кристаллах  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  (КРТ) изучалось в основном при воздействии высокоэнергетичных электронов ( $E > 1 \text{ МэВ}$ ), а также ионов  $\text{H}^+$  с энергией не более 0.5 МэВ [ $1^{-3}$ ]. При облучении ионами водорода [ $3$ ] основное внимание уделялось исследованию изменения свойств приповерхностной области образца, обусловленных введением электрически активных дефектов донорного типа. При этом отсутствуют данные о дефектах вакансионного типа, которые играют важную роль в процессах радиационного дефектообразования. В работе рассмотрены профили распределения электрически активных радиационных дефектов и проведено изучение параметров электрон-позитронной аннигиляции, связанной с вакансионными дефектами, в образцах КРТ, облученных высокоэнергетичными протонами.

Облучение проводилось ионами  $\text{H}^+$  с энергией 10 МэВ дозами  $8 \cdot 10^{13} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$  кристаллов КРТ  $p$ - и  $n$ -типа проводимости состава  $x = 0.3$ . Плотность тока при облучении составляла  $0.05 \text{ мкА/см}^2$ . Нагрев образцов при такой плотности тока ионов можно считать пренебрежимо малым. При исследовании профилей распределения носителей заряда толщина и исходная проводимость образцов подбирались таким образом, чтобы проводимость ненарушенного слоя полупроводника была много меньше проводимости имплантированного слоя [ $4$ ]. Удаление тонких слоев с поверхности образцов проводилось за счет

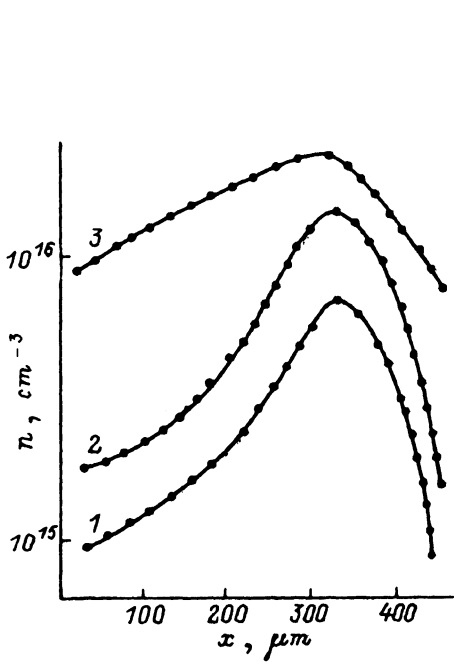


Рис. 1. Распределение концентрации электронов по глубине образца  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , имплантированного ионами  $\text{H}^+$  интегральными дозами  $\Phi$  ( $\text{см}^{-2}$ ): 1 —  $8 \cdot 10^{13}$ , 2 —  $5 \cdot 10^{14}$ , 3 —  $10^{15}$ .

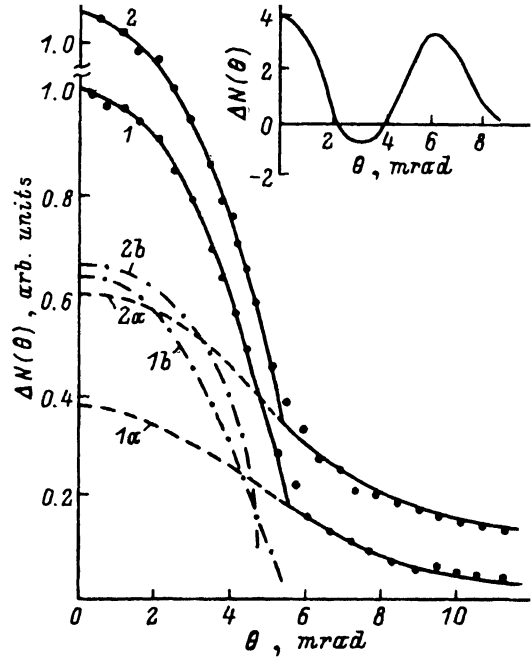


Рис. 2. Угловое распределение аннигиляционных фотонов для  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$   $p$ -типа проводимости до (1) и после (2) облучения ионами  $\text{H}^+$  дозой  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ . На вставке изображена разностная кривая для этих зависимостей. Составляющие кривых распределения: 1a, 2a — гауссовы, 1b, 2b — параболические.

травления в спиртовом растворе брома и путем выращивания анодно-го окисла на поверхности КРТ с последующим его удалением.

На рис. 1 приведены профили распределения объемной концентрации электронов  $n(x)$  по глубине полупроводника для различных доз облучения. При этом для всех доз облучения в распределении  $n(x)$  имеется ярко выраженный максимум, расположенный на глубине  $x_M \approx 330 \text{ мкм}$ . Рассчитанный пробег протонов с энергией 10 МэВ в КРТ ( $x = 0.3$ ) составляет  $R_p = 360 \text{ мкм}$ , что довольно близко к измеренному значению  $x_M$ . Необходимо также отметить, что профили  $n(x)$ , изображенные на рис. 1, по форме аналогичны профилям радиационных дефектов, полученным при имплантации ионов  $\text{H}^+$  с энергией 10 МэВ в Si и GaAs [5]. Полученные профили распределения электронов в облученных ионами  $\text{H}^+$  образцах свидетельствуют об образовании радиационных дефектов в области  $x < R_p$ . При облучении максимальной дозой  $10^{15} \text{ см}^{-2}$  (рис. 1, кривая 3) значение объемной концентрации электронов  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  намного ниже уровня насыщения зависимости концентрации  $n$  от величины дозы облучения ( $n_{\text{sat}} = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), реализованного облучением протонами с энергией 20 кэВ и дозой  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  [3]. Прежде всего это связано со значительными различиями в значениях пробега ионов  $\text{H}^+$  в рассматриваемых

случаях (более 100 раз) и в различных процессах радиационного дефектообразования. В то же время может быть отмечено размывание максимума распределения  $n(x)$  при увеличении дозы облучения (ср. кривые 1 и 3 на рис. 1). Наиболее вероятной причиной этого эффекта является диффузия межузельной ртути из района максимального скопления радиационных дефектов вблизи  $R_p$  к поверхности. Наличие «хвостов» в профилях  $n(x)$  для  $x > R_p$  также может быть связано с миграцией электрически активных дефектов в глубь образца.

Для получения информации об образующихся радиационных дефектах был проведен изохронный и изотремический отжиг облученных ионами  $H^+$  образцов КРТ в диапазоне 340–450 К по методике, описанной в работе [6]. Электрически активные дефекты отжигались в пределах одной стадии изохронного отжига в температурном интервале 350–430 К, как и в случае электронного облучения [6]. Значение энергии активации получалось одинаковым для всех доз облучения ( $1.5 \pm 0.2$ ) эВ, что совпадает со значением, полученным при отжиге радиационных дефектов, введенных при электронном облучении. Совпадение параметров отжига радиационных дефектов в кристаллах КРТ, облученных электронами и протонами с высокой энергией, позволяет сделать предположение, что электрически активные радиационные дефекты донорного типа и в том и в другом случае имеют одинаковую природу. Вероятнее всего, это комплексы на основе межузельных атомов ртути. Наблюдающиеся различия в порядках реакций кинетики отжига радиационных дефектов в этих случаях связываются нами с различием в процессах образования вакансионных стоков для межузельных атомов ртути. В этой связи особый интерес представляет изучение образующихся при облучении вакансионных дефектов.

С этой целью в работе проводились исследования зависимостей параметров электрон-позитронной аннигиляции от дозы облучения ионами водорода с энергией 10 МэВ в образцах КРТ  $p$ - и  $n$ -типа проводимости. Измерения углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ) производились на установке с угловым разрешением 1.0 мрад в диапазоне углов  $\pm 20$  мрад. В качестве источника позитронов использовался изотоп  $^{22}Na$  ( $\beta^+$ ,  $\gamma$ ) с активностью 8–10 мКи [7]. Для повышения эффективности захвата позитронов в образцах, облученных ионами  $H^+$ , в полирующем травителе был удален слой толщиной  $\sim 330$  мкм. В этом случае практически все позитроны будут поглощаться в области с максимальной концентрацией дефектов. Кривые УРАФ для образца КРТ  $p$ -типа проводимости до и после облучения ионами  $H^+$  дозой  $10^{14}$  см $^{-2}$  приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что кривая углового распределения для облученного образца существенно отличается от исходной кривой практически во всей области изменения угла  $\vartheta$ . Это свидетельствует о введении радиационных вакансионных дефектов на глубине, близкой к величине  $R_p$ . Кривая УРАФ для облученного образца  $n$ -типа проводимости демонстрирует аналогичные изменения, но в меньшей степени.

Сравнение параметров разложения кривых УРАФ на параболические и гауссовы составляющие, проведенного по методике, приведенной в работе [8], для образцов  $p$ - и  $n$ -типа проводимости также свидетельствует о том, что изменения аннигиляционных параметров (см.

Параметры разложения кривых углового распределения аннигиляционных фотонов для образцов  $Hg_{1-x}Cd_xTe$ , облученных ионами  $H^+$  с энергией 10 МэВ

Тип проводимости	Доза, $см^{-2}$	$\Gamma_{1/2}$ , мрад	$\vartheta_F$ , мрад	$\vartheta_g$ , мрад	$S_p$ , %
$n$	0	8.55	5.55	7.3	55
	$10^{15}$	8.37	5.36	7.5	51
$p$	0	8.41	5.45	6.6	44
	$10^{14}$	8.08	5.07	6.3	39

*Примечание.*  $\Gamma_{1/2}$  — ширина распределения на половине высоты вкривой;  $\vartheta_F$  — угол Ферми;  $\vartheta_g$  — характеристический параметр Гауссиана;  $S_p$  — относительная площадь параболы.

таблицу) более значительны для образцов с высокой исходной концентрацией вакансионных дефектов, т.е. для кристаллов  $p$ -типа. Это характерно и для кристаллов КРТ, облученных быстрыми электронами [8]. Как и в этом случае, наблюдается сужение кривой УРАФ с ростом дозы облучения ионами  $H^+$ . Однако при облучении  $H^+$  происходит существенное уменьшение угла  $\vartheta_F$ , в то время как ширина Гауссиана  $\vartheta_g$  практически не изменяется. Кроме того, не было зафиксировано появления узкой компоненты в малоугловой области кривых УРАФ, хотя концентрация донорных радиационных дефектов имеет тот же уровень, что и в образцах КРТ после облучения электронами дозой  $10^{18} см^{-2}$ . Характер изменения параметра  $S_p$  с дозой облучения свидетельствует о том, что захват позитронов осуществляется не на элементарные вакансионные дефекты, как в случае [9], а на более сложные комплексы в образцах, облученных ионами  $H^+$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что электрически активные дефекты донорного типа имеют одну и ту же природу при облучении электронами и ионами  $H^+$  с высокой энергией. Различие в процессах дефектообразования проявляется в формировании дефектов вакансионного типа, которые при отжиге играют роль стоков для межузельных атомов ртути. Распределение радиационных дефектов по глубине полупроводника локализовано в пределах имплантированной области. При этом дефектообразование происходит на всем протяжении пробега имплантированных ионов с последующей их миграцией к поверхности и в глубь образца для больших доз облучения.

#### Список литературы

- [1] A.V. Voitsekhovskii, Yu.V. Lilenko, A.P. Kokhanenko, A.S. Petrov. Rad. Eff., 61, 79 (1982).
- [2] А.В. Войцеховский, Е.М. Кирюшкин, А.П. Коханенко, К.Р. Курбанов, Ю.В. Лиленко, К.В. Шастов, А.П. Мамонтов, В.А. Коротченко. Изв. АН СССР. Неорг. матер., 24, 579 (1988).
- [3] Ю.В. Лиленко, К.В. Шастов, Н.В. Кузнецов. ФТП, 20, 1907 (1986).
- [4] А.С. Петров, В.С. Куликаускас, Ю.В. Лиленко, А.П. Коханенко, А.В. Войцеховский и др. Изв. вузов СССР. Физика, № 12, 83 (1988).
- [5] Ю.В. Булгаков, В.А. Зарицкая, Н.В. Кузнецов. Поверхность. Физика, химия, механика, 2, 90 (1990).

- [6] A.V. Voitsekhovskii, A.P. Kokhanenko, A.S. Petrov. Phys. St. Sol. (a), **90**, 241 (1986).  
[7] А.В. Войцеховский, А.П. Коханенко, Ю.В. Лиленко, А.Д. Погребняк, Ш.М. Рyzимов, Р.Д. Бабаджанов. ФТП, **20**, 815 (1986).  
[8] A.V. Voitsekhovskii, A.P. Kokhanenko, A.S. Petrov. Cryst. Res. Technol, **23**, 237 (1988).  
[9] C.D. Smith, P. Rice-Evans, N Shaw. Phys. Rev. Lett., **72**, 1108 (1994)

Редактор Т.А. Полянская

## Radiation defects generation in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ crystals by 10 MeV $\text{H}^+$ -ion bombardment

*A.V. Voitsekhovskii, A.G. Korotaev, A.P. Kokhanenko*

Siberian Physicotechnical Institute, Tomsk State University, 634050 Tomsk, Russia

Radiation defects generation in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0.3$ ) crystals have been studied 10 MeV proton bombardment with doses up to  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , at room temperature. The process was investigated by electrical profiling and positron annihilation method for vacancy type defects.

---