

УДК 621.315.592

Распределение профилей радиационных дефектов в КРТ после ионной имплантации

А. В. Войцеховский, А. Г. Коротаев, А. П. Коханенко
Сибирский физико-технический институт, г. Томск, Россия

Исследованы профили пространственного распределения дефектов при имплантации ионов в КРТ для различных условий внедрения: доза облучения, тип и энергия ионов, плотность тока ионов. Проведены расчеты профилей распределения электрически активных радиационных дефектов с учетом генерации комплексов дефектов вакансионной природы. Экспериментально определены профили распределения дефектов при внедрении ионов водорода и аргона при малых постоянных плотностях тока ионов, а также при внедрении ионов меди, вольфрама и алюминия при импульсном воздействии с высокой плотностью тока ионов. Методами вторичной ионной масс-спектрометрии, электрон-позитронной аннигиляции, резерфордовского обратного рассеяния ионов и дифференциальных Холловских измерений получены профили распределения внедренных ионов, вакансионных и протяженных дефектов, а также электрически активных дефектов, соответственно. Проанализированы особенности профилей рассматриваемых дефектов при различных условиях внедрения ионов.

Исследование радиационного дефектообразования в кристаллах $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) при облучении ионами показало, что радиационные дефекты сосредоточены, главным образом, на расстояниях от поверхности, превышающих длину среднего проецированного пробега ионов в материале. Наблюдаются особенности поведения профилей пространственного распределения дефектов по отношению к профилю внедренных ионов при высоких дозах облучения, а также при увеличении энергии ионов. До наших исследований практически отсутствовали данные о пространственном распределении концентрации электронов в имплантированных слоях КРТ, не проводился также сравнительный анализ профилей распределения структурных нарушений и электрически активных дефектов при ионном внедрении. Решению этих вопросов посвящена настоящая работа, в которой представлены оригинальные результаты экспериментального исследования распределений нарушений кристаллической решетки в КРТ после имплантации ионов при различных условиях. В работе использовались различные методы, позволяющие проводить экспериментальные исследования распределения по глубине образца электрически активных дефектов радиационного происхождения; структурных дефектов, образовавшихся при внедрении ионов; вакансионных позитрончувствительных дефектов; внедренных примесных атомов.

Облучение ионами H^+

Профили распределения объемной концентрации электронов $n(x)$ по глубине полупроводника для различных доз облучения ионами H^+ с энергией 10 МэВ при плотности тока 0,05 мкА/см² кристаллов КРТ ($x = 0,3$) [1] приведены на рис. 1. При этом для всех доз облучения в распределении $n(x)$ имеется ярко выраженный максимум, расположенный на глубине 330 мкм. Рассчитанный пробег протонов с энергией 10 МэВ в КРТ ($x = 0,3$) составляет 360 мкм, что довольно близко к измеренному значению. Необходимо отме-

тить размывание максимума распределения $n(x)$ при увеличении дозы облучения (см. рис. 1, кривые 1 и 3). Наиболее вероятной причиной этого эффекта является диффузия радиационных дефектов (РД) (междоузельных атомов ртути) из района максимального скопления РД вблизи R_p к поверхности. Наличие "хвостов" в профилях $n(x)$ для $x > R_p$ также связывается нами с миграцией электрически активных дефектов в глубь образца.

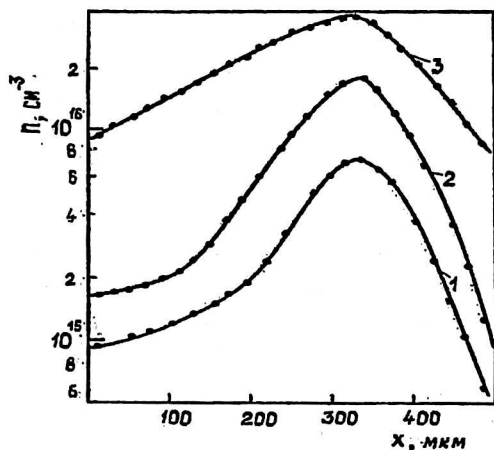


Рис. 1. Распределение концентрации электронов n по глубине $Hg_{1-x}Cd_xTe$, имплантированного ионами H^+ с энергией 10 МэВ интегральными дозами Φ ($см^{-2}$): 1 — $8 \cdot 10^{13}$; 2 — $5 \cdot 10^{14}$; 3 — 10^{15}

Для получения информации об образующихся при внедрении ионов вакансионных РД, которые также влияют на суммарное распределение $n(x)$, проводились исследования зависимостей параметров электрон-позитронной аннигиляции от дозы облучения ионами H^+ с энергией 10 МэВ в образцах КРТ p - и n -типа проводимости [1, 2]. Для повышения эффективности захвата позитронов в образцах, облученных ионами H^+ , в полирующем травителе был удален слой толщиной 300 мкм. В этом случае практически все позитроны поглощаются в области с максимальной концентрацией дефектов. Кривые УРАФ для образца p -типа проводимости КРТ 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 θ . Это свидетельствует о введении радиационных вакансионных дефектов на глубине, близкой к R_p . Кривая УРАФ для облученного образца n -типа проводимости демонстрирует аналогичные изменения, но в меньшей степени.

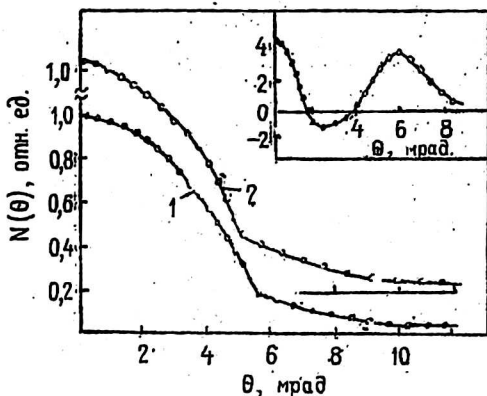


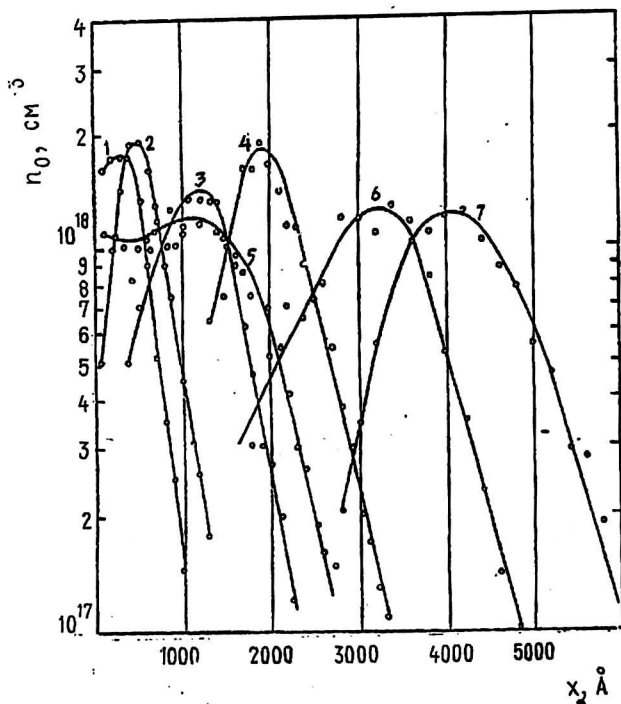
Рис. 2. Кривые УРАФ для p -КРТ до (кривая 1) и после (кривая 2) облучения ионами H^+ дозой $10^{14} см^{-2}$. (На вставке изображена разностная кривая)

Облучение ионами аргона

Результаты измерения распределения объемной концентрации электронов $n(x)$ по глубине после облучения кристаллов $Hg_{1-x}Cd_xTe$ различными дозами (Φ) ионов Ar^+ с энергиями 50 и 150 кэВ [3] представлены на рис. 3. Как видно, электроны локализованы в слое полупроводника толщиной, превышающей длину среднего проецированного пробега ионов указанных энергий. Уже при дозе $\Phi = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ спад концентрации $n(x)$ начинается на расстояниях, заметно больших, чем средний проецированный пробег R_p ионов Ar^+ .

Так, для энергий ионов 150 кэВ величина R_p составляет 950 \AA , в то время как концентрация электронов $n(x)$ начинает уменьшаться на расстоянии от поверхности $x = 1500 \text{ \AA}$. Следует указать, что после облучения кристаллов $Hg_{1-x}Cd_xTe$ малыми дозами ионов ($\Phi < 10^{12} \text{ см}^{-2}$) распределения концентрации электронов до определенных расстояний от поверхности слабо изменяются для исследованных энергий ионов Ar^+ (см. рис. 3, кривые 1, 5). При больших дозах ($\Phi = 10^{13}-10^{15} \text{ см}^{-2}$) на зависимостях $n(x)$ наблюдается явно выраженный максимум, расположенный на расстояниях от поверхности, превышающих длину проецированного пробега ионов R_p , причем положение максимума смещается в глубь полупроводника с увеличением дозы облучения.

Рис. 3. Распределение концентрации электронов $n(x)$ по глубине после имплантации ионов Ar^+ с энергиями 50 кэВ (кривые 1—4) и 150 кэВ (кривые 5—7) разными дозами Φ , см^{-2} :
1, 5 — 10^{12} ; 2 — 10^{13} ; 3, 6 — 10^{14} ;
4, 7 — 10^{15}



На рис. 4 приведены неориентированные и каналированные спектры РОР для исходного кристалла и кристаллов, имплантированных ионами Ar^+ с энергиями 50 и 150 кэВ интегральной дозой $\Phi = 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Форма спектра в интервале каналов 480—500 указывает на обеднение приповерхностной области полупроводника атомами ртути и на их неравномерное распределение по глубине. Так, вблизи поверхности концентрация атомов ртути заметно ниже объемного значения ($1,2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$) и достигает его лишь на глубине свыше 1000 А .

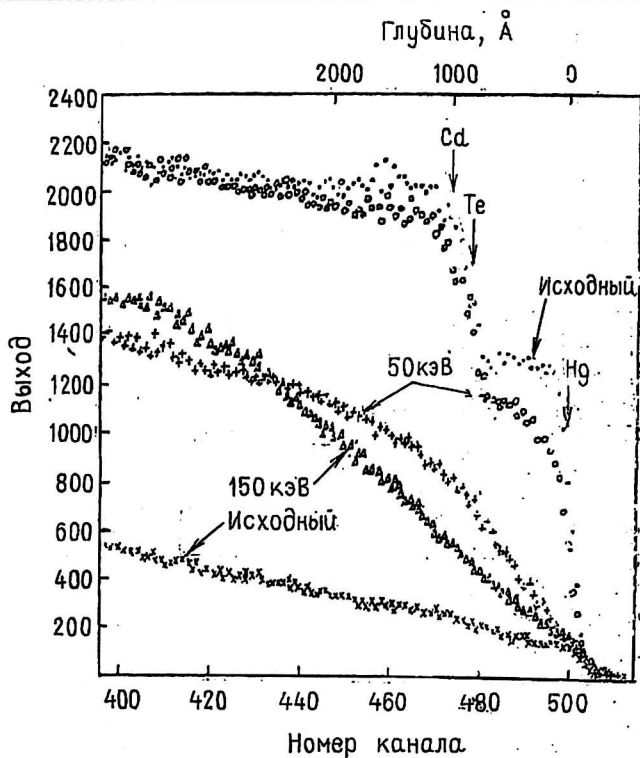


Рис. 4. Канализованные \times , Δ , $+$ и случайные \circ , \bullet спектры РОР для исходного и имплантированного ионами Ar^+ кристаллов n-KPT: $+$, \circ — $\Phi = 10^{15} \text{ см}^{-2}$; $E = 50 \text{ кэВ}$; Δ — $\Phi = 10^{15} \text{ см}^{-2}$; $E = 150 \text{ кэВ}$; \times , \bullet — до облучения

Распределение по глубине радиационных нарушений кристаллической структуры определялось из каналированных спектров РОР. Видно, что как и концентрация электронов $n(x)$, количество радиационных нарушений начинает уменьшаться на глубинах, превышающих длины проецированных пробегов ионов с указанными энергиями.

Импульсное внедрение ионов меди и вольфрама

Имплантация в КРТ ионов меди и вольфрама проводилась на импульсном ускорителе при плотности тока иона 10 и 3 мА/см^2 для меди и вольфрама, соответственно [4—5]. Дозы облучения ионами были 10^{16} – 10^{17} см^{-2} .

Профили распределения носителей заряда $n(x)$ после импульсной имплантации ионов меди подобны кривым при облучении ионами аргона. На зависимостях $n(x)$ наблюдается ярко выраженный максимум, расположенный на расстояниях от поверхности, намного превышающих R_p (для энергии ионов

Cu^+ 100 кэВ R_p составляет 340 Å), причем с ростом дозы имплантации положение максимума смещается в глубь полупроводника. Для всех доз облучения максимальное значение концентрации электронов составляет $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что соответствует “насыщению” концентрации электронов при облучении КРТ. Можно отметить, что в области внедрения ионов не отмечалось особенностей в поведении $n(x)$, что свидетельствует об отсутствии активации примеси в процессе имплантации. Все эти закономерности формирования профилей электрически активных дефектов (насыщение концентрации электронов, сдвиг максимума распределения $n(x)$ с ростом дозы облучения в глубь

полупроводника, локализация профилей на глубинах существенно больших, чем R_p) характерны, как уже было отмечено выше, и для режимов ионной имплантации при слабых токах в КРТ.

Спектры РОР кристаллов, имплантированных ионами меди, практически не отличаются от спектра исходного кристалла при всех используемых дозах облучения.

Спектры РОР для кристаллов КРТ, облученных ионами вольфрама дозой $\Phi = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, показывают, что облучение приводит к существенному обеднению приповерхностной области полупроводника атомами Hg и к их неравномерному распределению по глубине.

Результаты исследования имплантированных слоев твердого раствора КРТ методом РОР подтверждаются данными, полученными методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Анализ пространственного распределения радиационных дефектов донорного типа, образующихся при облучении ионами в данном режиме, показывает существование общих закономерностей процессов радиационного дефектообразования при имплантации ионов в режиме слабых токов (доли микроампер) и средних токов (миллиамперы). Вместе с тем профили $n(x)$, формирующиеся при рассматриваемом режиме, лежат ближе к поверхности и не наблюдается обеднения приповерхностного слоя полупроводника атомами ртути для доз до $\Phi = 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Облучение мощными импульсными пучками Al^+

Облучение проводилось на мощном импульсном ускорителе типа МУК ионами алюминия Al^+ с энергиями 150—450 кэВ дозами $\Phi = 2 \cdot 10^{12} - 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Плотность тока при облучении составляла 6—8 А/см², длительность импульса — 100 нс.

Анализ профилей концентрации электронов $n(x)$ для данного случая (рис. 5) показал, что практически все закономерности, характерные для ионной имплантации в КРТ, описанные в предыдущих разделах, имеют место и при мощном импульсном облучении.

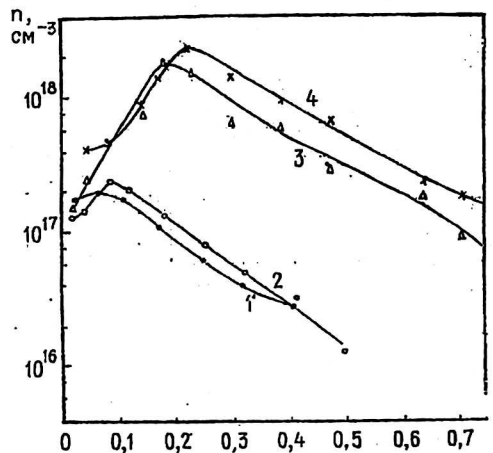


Рис. 5. Профили распределения концентрации электронов $n(x)$ в образцах КРТ n-типа проводимости (кривые 1, 4) и р-типа проводимости (кривые 2, 3) после облучения различными дозами ионов Al^+ Φ , см^{-2} :
1, 2 — 10^{12} , 3, 4 — 10^{13}

Высокая концентрация электронов наблюдается в слое полупроводника, превышающем глубину среднего проецированного пробега R_p ($\sim 1000 \text{ \AA}$) ионов данных энергий. При повышении дозы облучения максимум распреде-

ления электронов сдвигается в глубь полупроводника. Концентрация в максимуме распределения для дозы $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ $n_{\text{max}} = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что соответствует значению насыщения, связанного с "закреплением" уровня Ферми на уровне радиационных дефектов. При этом профили $n(x)$ практически совпадают в образцах, имевших исходно различный тип проводимости.

Некоторое отличие от случая стандартных режимов ионной имплантации заключается в том, что при дозе облучения $\Phi = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ значения n_{max} на порядок меньше значения насыщения $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, которая при такой дозе облучения достигается практически для всех исследованных нами стандартных режимах ионной имплантации. Похожая картина отмечалась нами ранее при высокоинтенсивной имплантации ионов меди.

Экспериментальные профили распределения примеси и дефектов для высокоинтенсивной имплантации ионными пучками алюминия, измеренные методом ВИМС, гамма резонансной методикой (рис. 6), хорошо согласуются с расчетными, полученными из уравнения диффузии атомов примеси и дефектов с учетом неоднородных, нестационарных полей температур и механических напряжений [6].

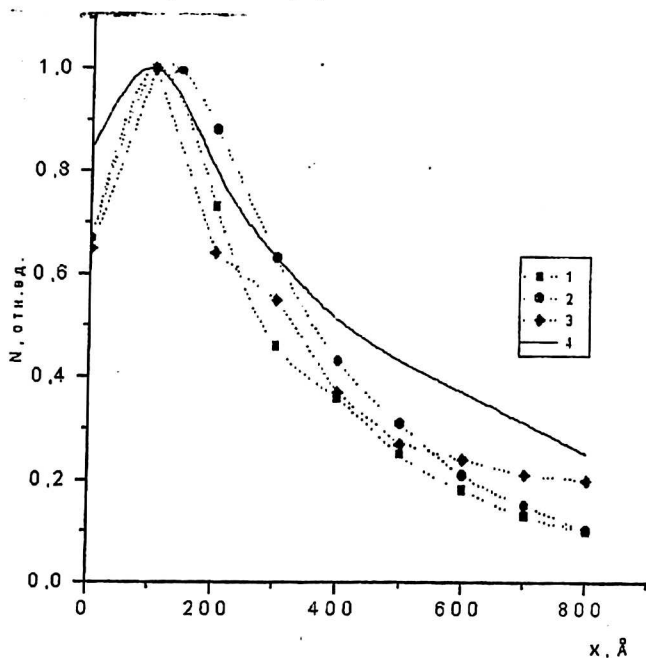


Рис. 6. Профили распределения примеси после воздействия мощных ионных пучков Al^{+} : 1, 2 — метод ВИМС; 3 — гамма-резонансная методика; 4 — расчет

Заключение

Приведенные пространственные распределения дефектов при имплантации ионов в КРТ объясняются рядом факторов, основными из которых являются следующие: диффузия междоузельных атомов ртути из области генерации радиационных дефектов вблизи R_p в глубь полупроводника и к его поверхности; образование в имплантированном слое протяженных вакансионных дефектов, захватывающих атомы междоузельной ртути и приводящие их в электрически неактивное состояние; генерация вакансионных дефектов, способствующих аннигиляции подвижных дефектов донорного типа в приповерхностной области полупроводника.

Наблюдающиеся при ионной имплантации узкозонных твердых растворов КРТ различия в дозах, при которых происходит насыщение дозовых зависи-

мостей слоевой концентрации электронов, достижение предельных значений объемной концентрации электронов в имплантированном слое, а также различия в величине сдвига максимума их распределения в глубь полупроводникового материала с ростом дозы облучения, определяются процессами "самоотжига" первичных радиационных дефектов и зависят от скорости набора дозы облучения.

Л и т е р а т у р а

1. Войцеховский А. В., Коротаев А. Г., Коханенко А. П. // ФТП. 1996. Т. 30. № 9. С. 1565—1569.
2. Войцеховский А. В., Коротаев А. Г., Коханенко А. П. // Изв. вузов. Сер. Физика. 1995. № 10. С. 3—21.
3. Петров А. С., Куликаускас В. С., Лиленко Ю. В. и др. // Там же, 1988. № 12. С. 83—90.
4. Войцеховский А. В., Коротаев А. Г., Коханенко А. П. и др.: Тез. докл. 20 Всес. совещ. по физике взаим. заряженных частиц. — М.: Изд-во МГУ, 1990. С. 98.
5. Войцеховский А. В., Коротаев А. Г., Коханенко А. П. и др.: Тез. докл. 3 Всес. конф. "Ионно-лучевая модификация полупр. и др. материалов". — Новосибирск, 1991. С. 2—9.
6. Voitsekhovskii A. V., Kokhanenko A. P., Korotaev A. G. et al. // Proceedings BEAMS-96. — Prague. 1996. V. 2. P. 817—820.

Radiation defect profiles in MCT for various ion implantation conditions

A. V. Voitsekhovskii, A. G. Korotaev, A. P. Kokhanenko
Siberian Physico-Technical Institute, Tomsk, Russia

Ion implantation induced defect profiles in $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (MCT) are observed for wide range ion current density (10^{-6} – 10 A/cm²). Distribution of implanted ions and different radiation damages were investigated theoretically and experimentally. Profiles of vacancy type, electrical active defects and extended damages in as-implanted MCT exceed the average projective ranges of implanted ions (R_p). At the same time it is not coincidence for different type defect profiles. Differences in damage profiles for low and high current density implantation are examined. We suppose some processes resulting in such defect distribution.