



**Beynəlxalq Konfrans "Fizika-2005"**  
**International Conference "Fizika-2005"**  
**Международная Конференция "Fizika-2005"**

7 - 9  
İyun  
June 2005  
Июнь

səhifə  
page 684-687  
стр.

**Bakı, Azərbaycan**

**Baku, Azerbaijan**

**Баку, Азербайджан**

**ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ДИФфуЗИОННЫХ И ИМПЛАНТАЦИОННЫХ ФОТОДИОДОВ ИЗ КРТ**

**ЭМИНОВ Ш.О., РАДЖАБЛИ А.А., ИБРАГИМОВ Т.И.**

*Институт Физики НАН Азербайджана, Баку*

Изучено воздействие импульсного гамма-излучения и нейтронного облучения на фотоэлектрические и электрофизические свойства р-n- переходов в  $Cd_xHg_{1-x}Te$  (х), полученных диффузией различных элементов (Cu, Ag, Au, Hg, Pt) а также ионной имплантацией различных ионов ( $B^+$ ,  $Al^+$ ,  $P^+$ ). Показано, что электрические и фотоэлектрические характеристики ионно-имплантационных р-n-переходов значительно улучшаются после радиационного облучения, в то время как свойства диффузионных фотодиодов существенно не изменились.

Узкозонный полупроводниковый твердый раствор  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) (в русскоязычной литературе - КРТ) в настоящее время остается одним из основных материалов для изготовления приемников излучения ближнего и среднего ИК-диапазона для систем военного и космического применения.

Из-за относительно низкого энергетического порога образования собственных дефектов в результате различных механических и термических воздействий, которым обычно подвергаются кристаллы КРТ в процессе изготовления приборов ИК фотоэлектроники в их кристаллической структуре наблюдаются существенные изменения. Наряду с этими воздействиями для создания приборов также используются методы облучения кристаллов электронами, протонами, нейтронами и  $\gamma$ -квантами различных энергий. Отличительной особенностью этих воздействий является то, что если часть механических и термических воздействий на приборы практически прекращается после изготовления приборов, то приборы, используемые в космической технике, постоянно подвержены радиационным воздействиям космических лучей широкого энергетического спектра. Так например, незащищенные приборы на ИСЗ могут получить за год дозу облучения, превышающую  $10^6$  рад, в основном за счет протонов и электронов высоких энергий, захваченных радиационными поясами Ван-Аллена. В промышленных ядерных установках приборы в основном подвергаются нейтронному облучению и  $\gamma$ -радиации. При этом характерные интегральные дозы облучения составляют, соответственно,  $10^{11}$  нейтронов/см<sup>2</sup> и  $10^4$  рад/см<sup>2</sup> для

$\gamma$ -лучей. Следует отметить, что можно сравнительно легко защитить приборы от воздействия протонов и электронов высоких энергий, в то время как обеспечить защиту от нейтронного потока и  $\gamma$ -лучей значительно сложнее.

Фотоэлектрические и электрофизические свойства кристалла во многом определяются дефектами его структуры. Относительная легкость генерации собственных дефектов в кристаллах КРТ позволяет управлять электрофизическими свойствами кристаллической структуры только за счет изменения концентрации таких дефектов без введения дополнительных примесей. Считается, что свойства нелегированных кристаллов и эпитаксиальных слоев КРТ в основном определяются вакансиями ртути (акцепторы) и остаточными донорами. р-тип проводимости нелегированного КРТ определяется вакансиями ртути  $V_{Hg}$ , причем концентрация их может быть изменена в широких пределах от  $10^{15}$  до  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Поэтому изучение влияния каждого из возможных видов воздействия на структуру фоточувствительной структуры может дать возможность управления дефектностью и служит конечной цели улучшения характеристик фотоприемников.

Исследованию влияния радиационного ионизирующего облучения на характеристики приборов, а также изучению стойкости приборов на основе КРТ посвящено достаточно много работ [1-5]. Целью же нашей работы является не изучение стойкости приборов перед нежелательными радиационными воздействиями, а наоборот, изучить возможности применения гамма и нейтронного облучения к созданию ИК-фотоприемников. С этой

целью нами изучено влияние ионизирующей радиации на фотоэлектрические свойства р-п переходов полученных методом диффузии различных атомов и ионной имплантацией различных ионов в КРТ.

### ЭКСПЕРИМЕНТ.

Объектом исследования были образцы р-п переходов, полученных диффузией меди, серебра, золота, ртути и платины, а также методом ионного легирования ионами бора, алюминия и фосфора в КРТ. Диффузионные и ионно-имплантированные р-п переходы были подвергнуты воздействию импульсного гамма-излучения мощностью  $1,0 \cdot 10^{10} \leq P_{\gamma} \leq 2,0 \cdot 10^{10}$  Рад/с и импульсного нейтронного облучения с плотностью потока  $8 \cdot 10^{11} \leq \Phi_n \leq 6 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> и с длительностью импульсов  $10^{-8} \leq \tau \leq 10^{-4}$  с.

Подложками для получения диффузионных и ионно-имплантированных р-п-переходов служили пластины КРТ с составом  $0,2 \leq x \leq 0,22$  с концентрацией и подвижностью носителей заряда  $n = 4 \cdot 10^{15} - 5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> и  $\mu = 3 \cdot 10^4 - 1,2 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/В·с при 300 К, соответственно. Перед диффузией и имплантацией эти пластины проходили цикл длительного термического отжига для уменьшения концентрации вакансий в материале и достижения единого типа проводимости (изотипности), заданного уровня концентрации и подвижности носителей заряда, одинаковых во всем объеме пластины.

Режимы получения диффузионных р-п-переходов подробно описаны в [6].

Ионная имплантация в пластин КРТ осуществлялась ионами бора, алюминия и фосфора с энергией 100-200 КэВ и дозой  $(2-5) \cdot 10^{13} - 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. После имплантации производился пост-имплантационный термический отжиг пластин в вакуумированной кварцевой ампуле при температурах от 150 °С до 200 °С в течении 8-30 минут.

При исследовании амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ионно-имплантированных р-п переходов установлено, что наибольшую граничную частоту 250-300 МГц (по уровню 0,7) имеют р-п переходы, легированные ионами фосфора P<sup>+</sup>. Переходы, легированные ионами Al<sup>+</sup> имели граничную частоту 150-200 МГц, а легированные ионами бора – 50-75 МГц.

После термообработки граничная частота р-п переходов по уровню 0,7, полученных легированием ионами Al<sup>+</sup> увеличилась от 180 МГц до 300 МГц, в то же время граничная частота по уровню 0,5 увеличилась от 380 МГц до 800 МГц. Типичные АЧХ таких р-п переходов, измеренные на разных стадиях технологической обработки представлена на рис.1.

На рис.2 показаны типичные ВАХ этих переходов полученных имплантацией ионами Al<sup>+</sup>. Вольтамперные характеристики (ВАХ) р-п переходов, измеренные непосредственно после имплантации не имели выраженного диодного характера из за большого тунельного тока. Такой вид ВАХ может быть связан с тем, что в результате ионной бомбардировки возникает гигантское пересыщение

кристалла ртутью, выбиваемой из приповерхностного слоя кристалла, обуславливающее диффузионное движение ртути, которое может подавлять дефекты акцепторной природы.

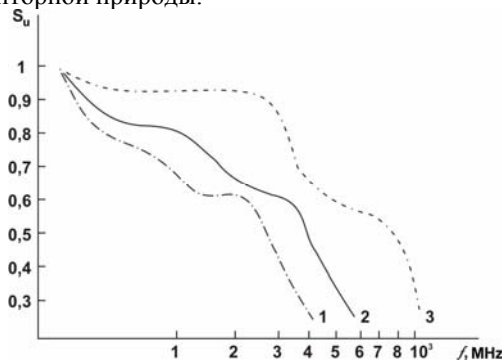


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика переходов легированных ионами Al<sup>+</sup>. 1-сразу после имплантации, 2-после термообработки, 3-после облучения.

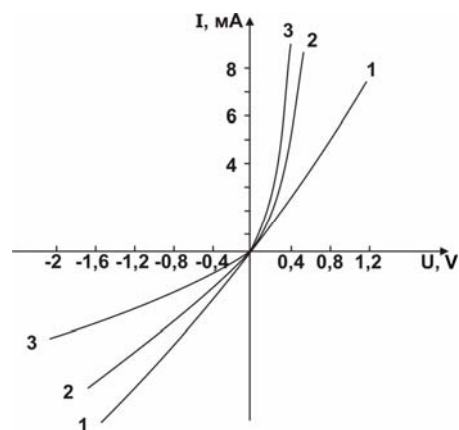


Рис. 2. ВАХ р-п переходов, легированных ионами Al<sup>+</sup>. 1-сразу после имплантации, 2-после термообработки, 3-после облучения.

После термического отжига параметры р-п перехода значительно улучшились: R<sub>0</sub> выросло в 3-5 раз, а ВАХ приобрели типичный диодный вид. ВАХ р-п переходов, полученных имплантацией фосфора, отличаются от ВАХ диодов полученных имплантацией бора и алюминия в худшую сторону.

В результате ионизирующего облучения граничная частота р-п переходов, полученных легированием ионами Al<sup>+</sup> достигла 450 МГц. В то же время граничная частота по уровню 0,5 после облучения увеличилась до 1 ГГц. ВАХ диодов также значительно улучшились.

В то же время заметных изменений в значениях электрофизических и фотоэлектрических параметров, в том числе АЧХ и ВАХ р-п переходов, изготовленных диффузионным способом, не было обнаружено. Этот результат совпадает с результатом работы Н.А.Кульчицкого, А.В.Войцеховского и др. [7], которые также не обнаружили каких-либо заметных изменений в значениях электрофизических и фотоэлектрических параметров эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом молекулярной эпитаксии (МЛЭ) к облучению высокоэнергетическими электронами (1-2 МэВ) при дозах облучения до 10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup> и при воздействии гамма-квантами Co<sup>60</sup> (E~1,25 МэВ, Φ=10<sup>5</sup>-10<sup>7</sup> Рад). В этой связи также

представляют интерес результаты работы [4], в которой изучалось влияние нейтронного облучения при потоках  $10^{13}$ - $10^{15}$  нейтронов/см<sup>2</sup> на свойства объемных кристаллов КРТ, выращенных методом Бриджмена. Здесь было установлено, что несмотря на рост концентрации электронов и уменьшение подвижности носителей заряда в кристалле, изменения механизма рассеяния носителей заряда не происходит. В то же время при аналогичные исследованиях, проведенных теми же авторами, но уже при значительно возросших потоках нейтронов  $\geq 10^{15}$  см<sup>-2</sup>, обнаружено рассеяние носителей заряда в кристалле, что можно идентифицировать как результат формирования в кристалле вакансионных кластеров ртути  $V_{Hg}$ . Воздействие ионизирующего излучения на свойства р-п переходов можно объяснить следующим образом. Известно, что тип радиационных дефектов кристаллической решетки зависит от энергии частиц и природы радиации.  $\gamma$ -лучи и электроны с энергией в несколько МэВ приводят, в основном, к образованию простых дефектов, которые можно описывать в терминах пространственных распределений точечных дефектов. Известно, что вероятность возникновения смещения атомов в результате непосредственного взаимодействия  $\gamma$ -квантов с ядрами вещества очень мала, поэтому основную роль в создании дефектов при облучении кристаллов  $\gamma$ -лучами играет действие быстрых электронов, возникающих в результате фотоэффекта и Комптона - эффекта. Таким образом, результат воздействия  $\gamma$ -лучей и высокоэнергетических электронов на структуру дефектов должен быть практически одинаковым, и сводится к возникновению неравновесных пар Френкеля, концентрация которых соизмерима с исходной концентрацией межузельных атомов ртути, аналогичной по действию с ростом концентрации электронов. При нейтронной бомбардировке велика вероятность возникновения пар Френкеля одновременно в соседних узлах решетки. В результате этого в кристалле возникают объемные нарушения в виде нескомпенсированных однократно заряженных межузельных атомов ртути, образующие так называемые суперкластеры, каждый из которых включает в себя подкластеры - несколько пространственных областей с сильными нарушениями кристаллической структуры. Таким образом, можно ожидать, что в результате воздействия ионизирующего излучения на КРТ в объеме кристалла должна увеличиваться концентрация электронов вне зависимости от природы облучения.

Изменения в АЧХ и ВАХ ионно-легированных р-п переходов и отсутствие изменений в свойствах диффузионных переходов (также, как и в эпитаксиальных слоях [7] и объемных кристаллах при нейтронном облучении [4]) приводят к следующему выводу. Подверженность кристаллической структуры к существенным и термодинамически устойчивым изменениям, по-видимому, связана не только с энергией и плотностью ионизирующих потоков, но также и со структурой дефектов, существующих в

кристалле до облучения. Кластеры, как неравновесные образования для своего формирования внутри кристалла и дальнейшего устойчивого существования обычно требуют энергетических затрат, значительно больших, по сравнению с энергиями, достаточных для их трансформации или же для частичного разрушения.

Аналогичная ситуация встречается в кристаллизации из растворов. Если руководствоваться понятиями «механизма ассоциатов» [8], то для начала кристаллизации из раствора необходимо, чтобы в растворе присутствовали зародыши кристаллизации, которыми являются т.н. критические ассоциаты - кластеры атомов. При сильном нагреве раствора-расплава выше температуры фазового равновесия жидкое-твердое, кластеры атомов разрушаются. Восстановление кластеров и, соответственно, начало кристаллизации в растворе в этом случае происходит при относительно глубоком переохладении, причем величина перегрева и переохладения прямо связаны.

При взаимодействии нейтронного и гамма-излучения с достаточной интенсивностью с точечными и кластерными радиационными дефектами, уже имевшихся в исходном образце после имплантации, некоторая часть этих кластеров распадается, создаются новые дефекты и, в любом случае, происходит перестройка дефектной структуры. В результате этого происходят изменения в картине пространственного распределения заряда в кристалле, приводящие к перекомпенсации объемного заряда, которая в свою очередь, проявляется в уменьшении плотности каналов утечки носителей тока, уширении слоя объемного заряда и росте RC-параметра перехода.

Для существенного изменения электро-физических свойств кристалла требуется существенное изменение в структуре его дефектной, в том числе, создания кластеров в нем. Кристаллы, в которых р-п переходы созданы посредством относительно низкотемпературной диффузии, как и в нашем случае, а также молекулярно-лучевой эпитаксией или другими низкотемпературными эпитаксиальными методами, имеют относительно низкий уровень нарушений по сравнению с последствиями ионной имплантации. Кластеры в этих кристаллах, как правило, отсутствуют.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что существенных изменений ВАХ и АЧХ диффузионных р-п переходов не было установлено из-за того, что по-видимому, величины энергии и потоков гамма-лучей и нейтронов, используемых нами ( $10^{13}$ - $10^{15}$  н/см<sup>2</sup>) была недостаточна для существенного преобразования дефектной структуры и в частности, для образования кластеров. Таким образом, можно заключить

- Амплитудно-частотные характеристики фотодиодов полученных ионной имплантацией значительно улучшаются после радиационного облучения.
- свойства диффузионных фотодиодов после радиационного воздействия существенно не изменились.

- 
- [1]. S. Margalov, Y. Nemorovsky, I. Rotstein. J. Appl. Phys., 50 (1979) 386
- [2]. С. П. Козырев, Л.К. Водопьянов, ФТП, 17 (1983)900
- [3]. А.И. Власенко, В.А. Гнатюк, Е.П. Копишинская, П.Е. Мозоль ФТП, 31, (1997) 820
- [4]. 4. Ф.Л. Зайтов, Ф.К. Исаев, А.В. Горшков. Дефекто- образование и диффузионные процессы в некоторых полупроводниковых твердых растворах. Баку (1984)
- [5]. К.Д. Мынбаев, В.И. Иванов-Омский. ФТП, 37 (2003), 1153
- [6]. А.А. Раджабли, Fizika, 14, (2000) 3
- [7]. 7. Н.А. Кульчицкий, А.В. Войцеховский и др. Материалы XI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике, электронным и ионно-плазменным технологиям, Москва, 1998 г
- [8]. 8. С.А. Строителев. Кристаллохимический аспект технологии полупроводников. Новосибирск (1976).