

## Structural and electrophysical properties of HgCdTe heterostructures, grown by MBE on Si (310) substrates

M. V. Yakushev, A. A. Babenko, V. S. Varavin, V. V. Vasil'ev, L. V. Mironova, D. N. Pridachin, V. G. Remesnik, I. V. Sabinina, Yu. G. Sidorov, A. O. Suslyakov  
Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, Russia

*Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te layers with x value equal to 0.3—0.34 were grown on Si (310) substrates by MBE method. Carrier concentration and mobility in the grown films were measured by Hall method. Density of stacking faults, sprouting dislocations and antiphase boundaries were measured by the method of the selective etching. The density of macroscopic V-defects was defined. Matrix of 128×128 photodiodes was made. One has critical frequency of photosensitivity  $\lambda_{1/2}(77\text{ K}) = .,07\ \mu\text{m}$  and good photoelectric parameters.*

УДК 621.383

## Воздействие ионизирующего излучения на электрические и фотоэлектрические свойства фотодиодов на основе Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te

Ш. О. Эминов, А. А. Раджабли, Т. И. Ибрагимов  
Институт физики НАН Азербайджана, г. Баку, Республика Азербайджан

*Изучено воздействие импульсного гамма-излучения и нейтронного облучения на фотоэлектрические и электрофизические свойства p-n-переходов в Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te (x), полученных диффузией различных элементов (Cu, Ag, Au, Hg, Pt), а также ионной имплантацией различных ионов (B<sup>+</sup>, Al<sup>+</sup>, P<sup>+</sup>). Показано, что электрические и фотоэлектрические характеристики ионно-имплантационных p-n-переходов значительно улучшаются после радиационного облучения, в то время как свойства диффузионных фотодиодов существенно не изменились.*

Узкозонный полупроводниковый твердый раствор Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te (0 ≤ x ≤ 1) (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, термических и прочих воздействий, которым обычно подвергаются кристаллы в процессе изготовления приборов ИК-фотоэлектроники, в том числе при шлифовке и полировке, диффузии, эпитаксиальном росте, ионной имплантации, фотолитографии и др., в кристаллической структуре КРТ наблюдаются существенные изменения.

Наряду с вышеуказанными воздействиями для создания приборов также используются методы облучения кристаллов электронами, протонами,

нейтронами и γ-квантами различных энергий. Отличительной особенностью этих воздействий является то, что если часть механических и термических воздействий на приборы практически прекращается после изготовления приборов (за исключением климатических воздействий), то полупроводниковые приборы, используемые в космической технике, постоянно подвержены радиационным воздействиям космических лучей широкого энергетического спектра. Так, например, незащищенные приборы на спутниках Земли могут получить за один год дозу облучения, превышающую 10<sup>6</sup> рад в основном за счет протонов и электронов высоких энергий, захваченных радиационными поясами Ван Алена. В промышленных ядерных установках приборы в основном подвергаются нейтронному облучению и γ-радиации. При этом характерные интегральные дозы облучения составляют, соответственно, 10<sup>11</sup> нейтронов на

$1 \text{ см}^2$  и  $10^4$  рад — 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.  $P$ -тип проводимости нелегированного КРТ определяется вакансиями ртути  $V_{\text{Hg}}$ , причем концентрация их может быть изменена в широких пределах — от  $10^{15}$  до  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Поэтому изучение влияния каждого из возможных видов воздействия на дефектную структуру фоточувствительной структуры может способствовать управлению дефектностью и послужит 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]. Нашей целью не является изучение стойкости приборов перед нежелательными радиационными воздействиями, а, наоборот, — изучение возможности применения гамма- и нейтронного облучения к созданию ИК-фотоприемников. Для этого мы исследовали влияние ионизирующей радиации на фотоэлектрические свойства  $p$ - $n$ -переходов, полученных методом диффузии различных атомов и ионной имплантацией различных ионов в КРТ.

### Эксперимент

Объектом исследования были образцы  $p$ - $n$ -переходов, полученных диффузией меди, серебра, золота, ртути и платины, а также методом ионного легирования ионами бора, алюминия и фосфора в КРТ. Подложками служили пластины КРТ с составом  $0,2 \leq x \leq 0,22$  с концентрацией и подвижностью носителей заряда, соответственно,  $n = 4 \cdot 10^{15} \div 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и  $\mu = 3 \cdot 10^4 \div 1,2 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при 300 К, которые проходили цикл длительной термической обработки 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  $p$ - $n$ -переходов подробно описаны в [6].

Ионная имплантация пластин КРТ осуществлялась ионами бора, алюминия и фосфора с энергией 100—200 КэВ и дозой  $(2\text{—}5) \cdot 10^{13}\text{—}10^{15} \text{ см}^{-2}$ . После имплантации проводился постимплантационный термический отжиг пластин в вакуумированной кварцевой ампуле при температурах 150—200 °С в течение 8—30 мин.

При исследовании амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ионно-имплантированных  $p$ - $n$ -переходов установлено, что наибольшую граничную частоту 250—300 МГц (по уровню 0,7) имеют  $p$ - $n$ -переходы, легированные ионами фосфора  $\text{P}^+$ ;  $p$ - $n$ -переходы, легированные ионами  $\text{Al}^+$ , имели граничную частоту 150—200 МГц, а легированные ионами бора — 50—75 МГц.

После термообработки граничная частота  $p$ - $n$ -переходов по уровню 0,7, полученных легированием ионами  $\text{Al}^+$ , увеличилась с 180 до 300 МГц, в то же время граничная частота по уровню 0,5 увеличилась с 380 до 800 МГц. Типичные АЧХ таких  $p$ - $n$ -переходов, измеренные на разных стадиях технологической обработки, представлены на рис. 1.

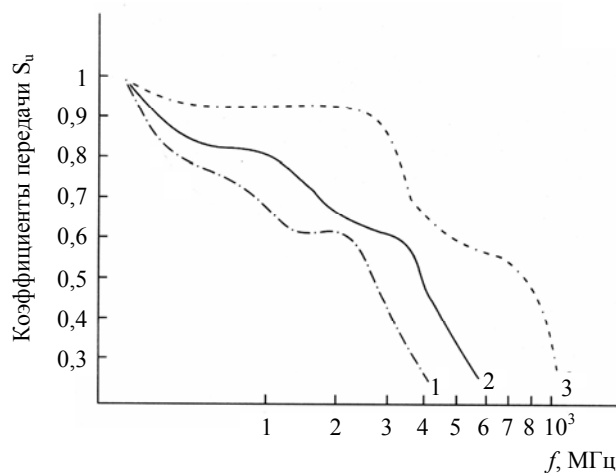


Рис. 1. АЧХ  $p$ - $n$ -переходов, легированных ионами  $\text{Al}^+$ : 1 — сразу после имплантации; 2 — после термообработки; 3 — после облучения

Вольт-амперные характеристики (ВАХ)  $p$ - $n$ -переходов, измеренные непосредственно после имплантации, не имели выраженного диодного характера из-за большого туннельного тока. Такой вид ВАХ может быть связан с тем, что в результате ионной бомбардировки возникает гигантское пресыщение кристалла ртутью, выбиваемой из приповерхностного слоя кристалла, обуславливающее диффузионное движение ртути, которое может подавлять дефекты акцепторной природы.

После термического отжига параметры *p-n*-перехода значительно улучшились:  $R_0$  выросло в 3—5 раз, а ВАХ приобрели типичный диодный вид, ВАХ *p-n*-переходов, полученных имплантацией фосфора, отличаются от ВАХ диодов, полученных имплантацией бора и алюминия, в худшую сторону. На рис. 2 показаны типичные ВАХ этих переходов, полученных имплантацией ионами  $Al^+$ .

*p-n*-переходы, полученные диффузией, а также ионной имплантацией, после термообработки 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  $8 \cdot 10^{11} \leq \Phi_f \leq 6 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> и длительностью импульсов  $10^{-8} \leq \tau \leq 10^{-4}$  с.

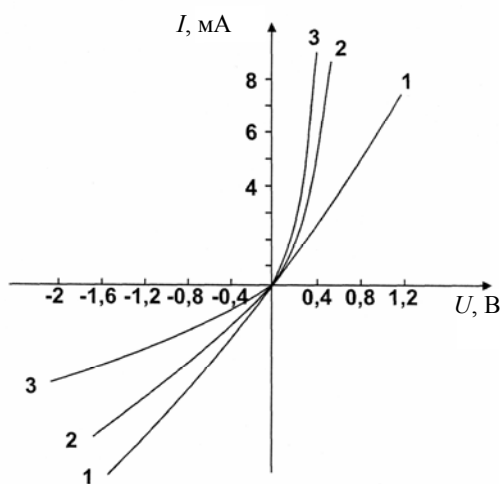


Рис. 2. ВАХ *p-n*-переходов, легированных ионами  $Al^+$ :  
1 — сразу после имплантации; 2 — после термообработки;  
3 — после облучения

В результате ионизирующего облучения граничная частота *p-n*-переходов, полученных легированием ионами  $Al^+$ , достигла 450 МГц, а 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 *p-n*-переходов, изготовленных диффузионным способом, не было обнаружено. Эти данные совпадают с результатами работы авторов [7], которые также обнаружили отсутствие заметных изменений в значениях электрофизических и фотоэлектрических параметров эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом молекулярной эпитаксии (МЛЭ) при облучении высокоэнергетическими электронами (1—2 МэВ) с дозами облучения до  $10^{16}$  см<sup>-2</sup> и при воздействии гамма-квантами ( $Co^{60}$ ); ( $E \sim 1,25$  МэВ,  $\Phi = 10^5$ — $10^7$  рад). 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), и было установлено, что хотя концентрация электронов в кристалле возрастала, а подвижность носителей заряда падала, изменения механизма рассеяния носителей заряда обнаружено не было. Аналогичные исследования, проведенные теми же авторами, но уже при потоках нейтронов  $\geq 10^{15}$  см<sup>-2</sup>, привели, по их заключению, к механизму рассеяния в кристалле, который можно идентифицировать как результат формирования в кристалле вакансионных кластеров ртути ( $V_{Hg}$ ).

Воздействие ионизирующего излучения на свойства *p-n*-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 мегаэлектронвольт 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 Комpton-эффекта.

Таким образом, результат воздействия  $\gamma$ -лучей и высокоэнергетических электронов на структуру дефектов должен быть практически одинаковым и сводиться к возникновению неравновесных пар Френкеля, концентрация которых соизмерима с исходной концентрацией междоузельных атомов ртути, аналогичной по действию росту 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 междоузельных атомов ртути, образующие так называемые суперкластеры, каждый из которых включает в себя несколько пространственных областей с сильными нарушениями кристаллической структуры — подкластеры. Обобщая вышесказанное, можно ожидать, что в результате воздействия ионизирующего излучения на КРТ вне зависимости от природы облучения в объеме кристалла должна увеличиваться концентрация электронов.

Изменения в АЧХ и ВАХ ионно-легированных *p-n*-переходов и отсутствие воздействия радиации на диффузионные переходы (так же, как и на эпитаксиальные слои [7] и объемные кристаллы при

нейтронном облучении [4]), приводят к выводу о том, что подверженность кристаллической структуры существенным и термодинамически устойчивым изменениям, по-видимому, связана не только с энергией и плотностью ионизирующих потоков, но и со структурой дефектов, существующих в кристалле до облучения. Кластеры как неравновесные образования для своего формирования и устойчивого существования требуют обычно значительно больших энергетических затрат, нежели энергии, достаточные для их трансформации или же для частичного разрушения.

Аналогичная ситуация встречается и при эпитаксиальной кристаллизации из растворов, где (если руководствоваться понятиями "механизма ассоциатов" [8]) для начала кристаллизации из раствора, в котором критические ассоциаты (кластеры) атомов, являющиеся зародышем кристаллизации, при сильном перегреве раствора относительно температуры термодинамического равновесия жидкое—твердое разрушаются, и для их восстановления, т. е. для начала кристаллизации, необходимо относительно глубокое переохлаждение.

При взаимодействии гамма- и нейтронного излучений с достаточной интенсивностью с точечными и кластерными радиационными дефектами, уже имевшимися 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-параметров перехода.

Существенное изменение электрофизических свойств кристалла требует существенного же из-

менения его дефектной структуры, в том числе создания кластеров в нем. Кристаллы, в которых *p-n*-переходы созданы относительно низкотемпературной диффузией, как и в нашем случае, а также молекулярно-лучевой эпитаксией или другими низкотемпературными эпитаксиальными методами, имеют по сравнению с последствиями ионной имплантации относительно низкий уровень нарушений, и кластеры в них, как правило, изначально отсутствуют.

Исходя из вышесказанного можно заключить, что существенных изменений ВАХ и АЧХ диффузионных *p-n*-переходов не было установлено в связи с тем, что, по-видимому, величина энергии и потоков гамма-лучей и нейтронов, используемая в нашей работе ( $10^{13}$ — $10^{15}$  н/см<sup>2</sup>), была недостаточной для существенного преобразования дефектной структуры, и в частности для образования кластеров.

#### Л и т е р а т у р а

1. Margalov S., Nemorovsky Y., Rotstein I.// J. Appl. Phys. 1979. № 50. P. 386.
2. Козырев С. П., Водопьянов Л. К.// ФТП, 1983. № 17. С. 900.
3. Власенко, А. И., Гнатюк В. А., Копишинская Е. П., Мозоль П. Е.// Там же. 1997. № 31. С. 820.
4. Заитов Ф. Л., Исаев Ф. К., Гориков А. В. Дефектообразование и диффузионные процессы в некоторых полупроводниковых твердых растворах. — Баку: Азернешр, 1984.
5. Мынбаев К. Д., Ивнов-Омский В. И.// ФТП. 2003. № 37. С. 1153.
6. Раджабли А. А.// Fizika. 2000. № 14. С. 3.
7. Кульчицкий Н. А., Войцеховский А. В.: Матер. XI Международ. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике, электронным и ионно-плазменным технологиям. — М., 28—30 октября 1998.
8. Строителев С. А. Кристаллохимический аспект технологии полупроводников. — Новосибирск, 1976.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

## Influence of radiation on photoelectrical and electrical properties of cadmium mercury telluride photodiodes

Sh. O. Eminov, A. A. Radjabli, T. I. Ibragimov

Institute of Physics of the Azerbaijan National Academy of Science, Baku, Azerbaijan

*Influence of both gamma and neutron radiation treatment on photoelectrical and electrical properties of photodiodes produced on the base Cadmium Mercury Telluride by means of both diffusion of Cu, Ag, Au, Hg, Pt and ion implantation of different ions ( $B^+$ ,  $Al^+$ ,  $P^+$ ) have been investigated. It is shown that characteristics of the ion implantation photodiodes severally improved as a result of thermal treatment and radiation, while the changing in properties of diffusion photodiodes upon radiation was not found.*

