

ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ НА СТРУКТУРНЫХ МОДИФИКАЦИЯХ ДИФОСФИДА ЦИНКА

И.Г. Стамов

Государственный университет им. Т. Г. Шевченко, MD 3300,

г. Тирасполь, Республика Молдова

istamov51@mail.ru

Abstract. *The charge transfer and photoeffect in the heterojunction formed by the epitaxial growing of the one structure modification of the ZnP_2 on the other are investigated. It was stated that the transitive processes on the interface of the region of space charge and the phase of heterojunction $\alpha(n) - \beta(p) - ZnP_2$ influence the definitive action on the spectral and temperature characteristics of the structure. It was shown that the composition of the domains of the space charge of the junction corresponds to the α and β phases of ZnP_2 , which form the heterojunction. On the interface of these phases the layer of low conductivity was observed which affects the heterojunction characteristics.*

Ключевые слова: *гетеропереходы, перенос заряда, фотоэффект*

I. Введение

Гетеропереходы на полиморфных модификациях дифосфида цинка обнаружены и изучены в [1]. Природа образования α - β ZnP_2 не соответствует известным моделям гетероэпитаксии. В [2] показано, что эпитаксиальный рост одной модификации на другую обусловлен практически идентичными атомными сетками в некоторых кристаллографических плоскостях.

Образцы гетеропереходов α - β ZnP_2 для исследований получены из газовой фазы и при охлаждении расплава ZnP_2 . Кристаллы α - и β - фазы дифосфида цинка, составляющие гетеропереходную структуру, имеют четко выраженные грани естественного роста. Граница гетероперехода только в некоторых случаях имеет выраженную кристаллографическую ориентацию. Из жидкой фазы гетеропереходные структуры образуются при охлаждении расплава и представляют собой чередующиеся α и β слои. Такой характер роста указывает на то, что переход в слоях из одной фазы в другую, в данном случае, связан с изменением соотношения концентраций компонентов соединения при температуре кристаллизации. В соответствии с диаграммой состояния Zn-P максимальная растворимость Zn и P в соединении составляет 0,01 ат.% [3]. Состав структурных дефектов и равновесие в дефектной системе определяются соотношениями компонентов соединения при температуре кристаллизации, режимом охлаждения и характеристиками газовой фазы при кристаллизации и охлаждении кристаллов [4]. В зависимости от условий роста из газовой фазы образуются изотипные и анизотипные n - p гетеропереходы. Нами исследованы анизотипные гетеропереходы $\alpha(n) - \beta(p) - ZnP_2$.

II. Экспериментальные результаты

Вольт - амперные характеристики (ВАХ) гетероперехода $\alpha - \beta - ZnP_2$ представлены на рис.1. В области малых токов и при напряжениях $U > (50 - 100)$ мВ (рис.1,а) зависимости тока от напряжения описываются экспоненциальной функцией $J = J_0 \exp[qU/\eta kT]$ с коэффициентом $\eta = 1.22-1.23$ при комнатной температуре. Коэффициент η с ростом

температуры до (380 – 390) °С незначительно уменьшается, затем растет. Увеличение η с ростом температуры обусловлено увеличением темпа рекомбинационных процессов. Так как высота барьера для дырок намного больше высоты барьера для электронов, то током дырок можно пренебречь и считать, что ток определяется электронной составляющей, а рекомбинация происходит в узкозонной части структуры. При дальнейшем росте напряжения ток ограничен сопротивлением базы диода.

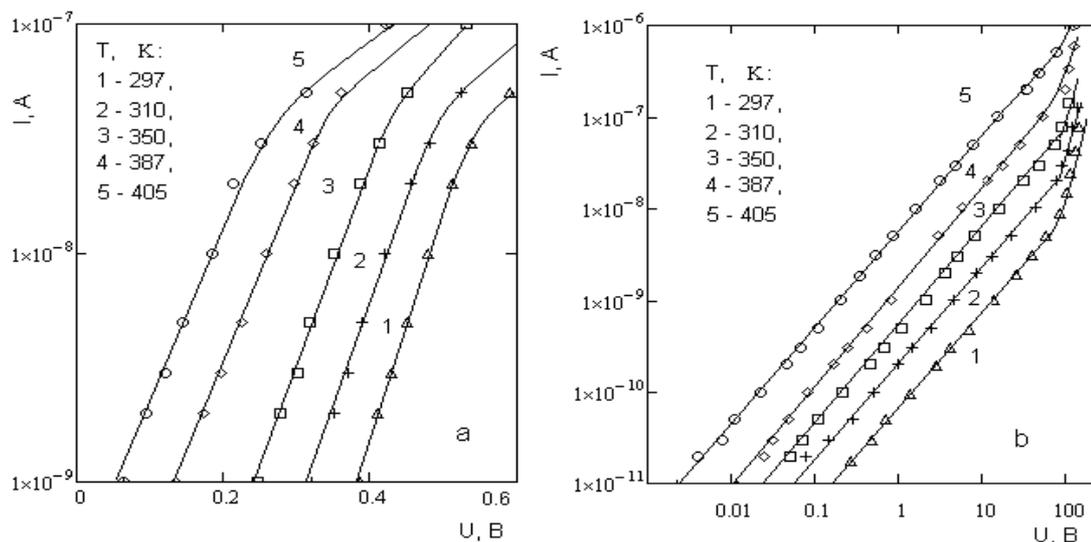


Рисунок 1 Вольтамперные характеристики гетероперехода $\alpha - \beta - \text{ZnP}_2$ а – прямые, б – обратные.

Во всех исследованных структурах ВАХ при обратном включении до пробоя описывается линейной зависимостью. Ток гетероперехода при обратном включении определяется неосновными носителями $\alpha -$ и $\beta -$ модификаций ZnP_2 . Температурная зависимость тока на этом участке имеет активационный характер с энергией $E_a = (0.25-0.27)$ эВ. Линейный характер тока в допробойной части ВАХ может быть связан с токами ограниченными пространственным зарядом в высокоомной части $\beta -$ фазы при инжекции носителей заряда из $\alpha -$ области. Слой с низкой проводимостью в $\beta -$ фазе ZnP_2 может быть образован изменением состава дефектов при переходе от одной фазы к другой, так как достоверно известно, что концентрация вакансий фосфора определяется парциальными давлениями фосфора и цинка, а также то, что при низких давлениях фосфора растет $\alpha -$ фаза ZnP_2 , при высоких $-\beta -$ фаза.

При достаточно больших электрических полях (близких к напряжению пробоя) наблюдается некоторое релаксационное уменьшение тока, связанное с полевым опустошением ловушек в ОПЗ. При этом линейный закон изменения тока от напряжения нарушается.

Пробой в исследуемых структурах аналогичен, по характеру зависимостей тока от напряжения и температуры, пробую в структурах металл – $\alpha - \beta - \text{ZnP}_2$ [5,6]. Отрицательный температурный коэффициент напряжения пробоя и характер ВАХ указывают на туннельную природу, а низкие величины барьеров туннелирования позволяют предполагать, что эти процессы происходят с участием уровней дефектов [7,8]. Напряжения пробоя структур, полученных в разных технологических условиях, составляют (40 – 120) В.

Вольт - фарадные характеристики (С-V) исследованы в интервале температур (273 – 420) °С и частот – (10 – 10⁶) Нз. Зависимости емкости от напряжения на низких частотах, в координатах $1/C^2 - U$, содержат два близких к линейным участка (рис.2). Наклон зависимостей уменьшается при увеличении частоты измерительного сигнала. Контактная

разность потенциалов, определенная по экстраполяции низковольтного участка зависимости $1/C^2$ к нулю, составляет 0,6 В и 0,9 В на низких и на высоких частотах соответственно. Высоковольтный участок, соответствующий более низкоомной области, по характеру зависимостей совпадают с аналогичными характеристиками барьеров металл- α -ZnP₂.

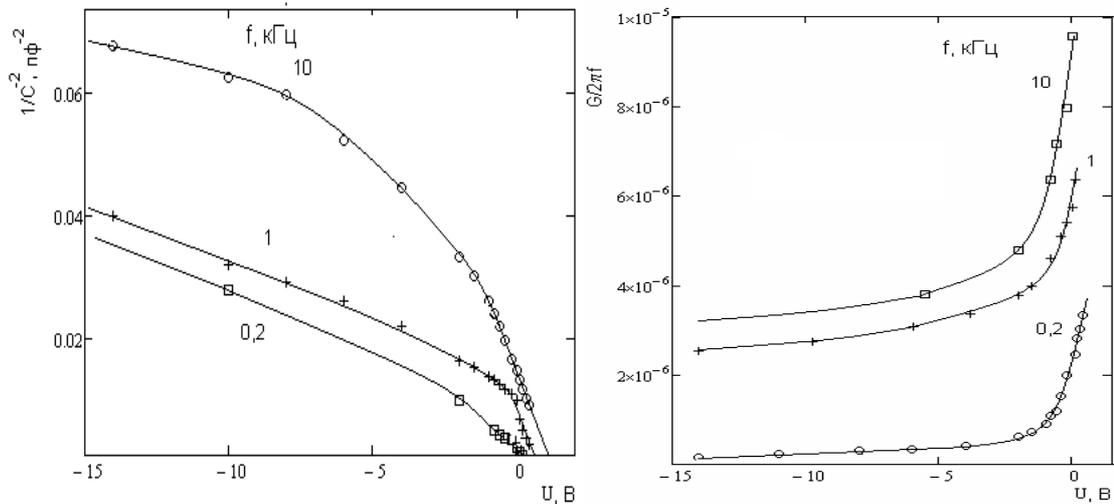


Рисунок 2 Зависимости емкости и проводимости гетероперехода $\alpha - \beta$ -ZnP₂ от обратного смещения при различных частотах.

Низковольтный участок может быть отнесен к изменению потенциала в моноклинной фазе структуры. Прямое смещение, приложенное к барьеру, увеличивает емкость и проводимость на всех частотах при всех температурах. Зависимость проводимости от обратного смещения U имеет минимум. Рост проводимости при больших обратных смещениях связан с пробойными явлениями в структуре. Характер поведения ВФХ указывают, что структуры являются резкими.

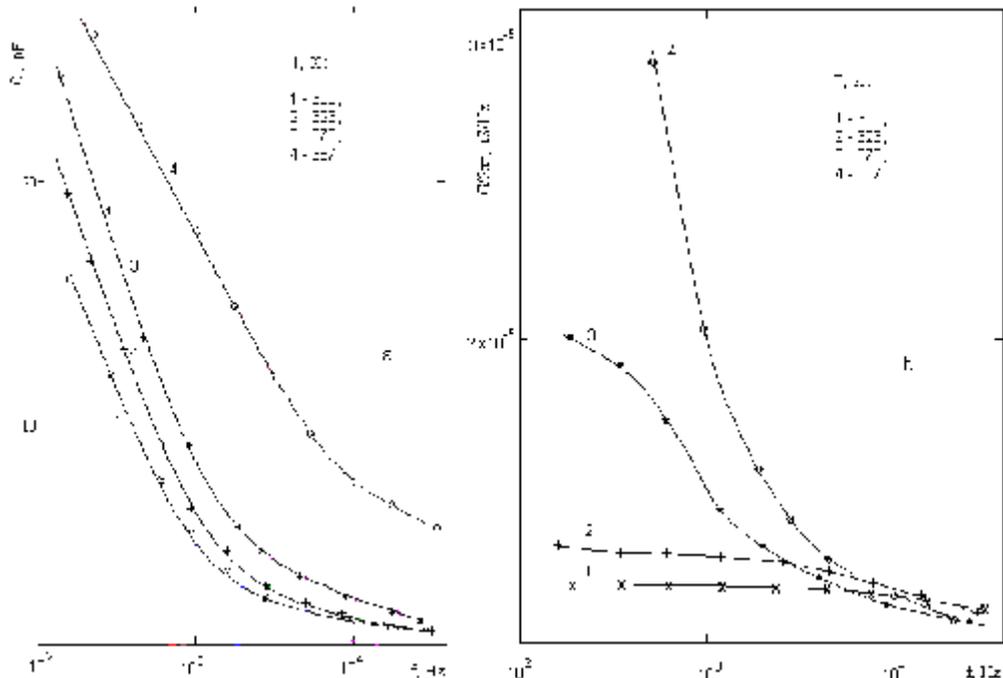


Рисунок 3 Частотные характеристики
а) емкости и б) проводимости гетероперехода $\alpha - \beta$ -ZnP₂.

Полная проводимость $Y = G + j\omega C$ структур $\alpha - \beta - \text{ZnP}_2$ является функцией частоты переменного напряжения, постоянного напряжения смещения перехода, подсветки и температуры, зависит в некоторой степени от предистории образца - степени и способа заполнения глубоких уровней в ОПЗ. На рис. 3 представлены зависимости емкости $C(\omega)$ и проводимости $G(\omega)$ от частоты структур $\alpha - \beta - \text{ZnP}_2$ для нескольких температур. С ростом частоты емкость уменьшается по величине. В отличие от барьеров Шоттки $\alpha -$ и $\beta - \text{ZnP}_2$, проводимость гетероперехода в этом температурном интервале с ростом частоты падает.

Следует отметить, что после включения и выключения прямого смещения емкость C увеличивается, а проводимость G уменьшается. Емкость уменьшается, а проводимость растет при выдержке структуры в темноте. Эти изменения связаны с перезарядкой более глубоких уровней и изменением степени компенсации ОПЗ. Все измерения проведены после установления равновесных значений Y .

Полученные данные из исследований частотной и температурной характеристик полной проводимости гетероперехода позволяют считать, что низкочастотные зависимости емкостной составляющей полной проводимости гетероперехода определяются процессами перезарядки уровней на границе ОПЗ в α фазе ZnP_2 . Обнаружению роста активной проводимости в этой области, по-видимому, препятствует высокоомный слой на границе раздела в β фазе. Энергии залегания уровней из этих измерений совпадают с аналогичными величинами для выпрямляющих контактов металл- $\alpha - \text{ZnP}_2$.

Область спектральной чувствительности $p(\beta) - n(\alpha) - \text{ZnP}_2$ гетероперехода находится в интервале длин волн от 860 до 400 нм и определяется энергетической структурой зон обеих модификаций (рис.4).

Край фотоэффекта определяется дипольно разрешенными прямыми переходами. При освещении структуры с торца, в спектре фототока при энергиях фотонов $nh \geq 2,4$ эВ проявляется минимальный прямой переход α - фазы ZnP_2 . В исследованных структурах обнаружен пик фототока при энергиях фотонов 2.07 эВ. В спектрах фототока барьеров

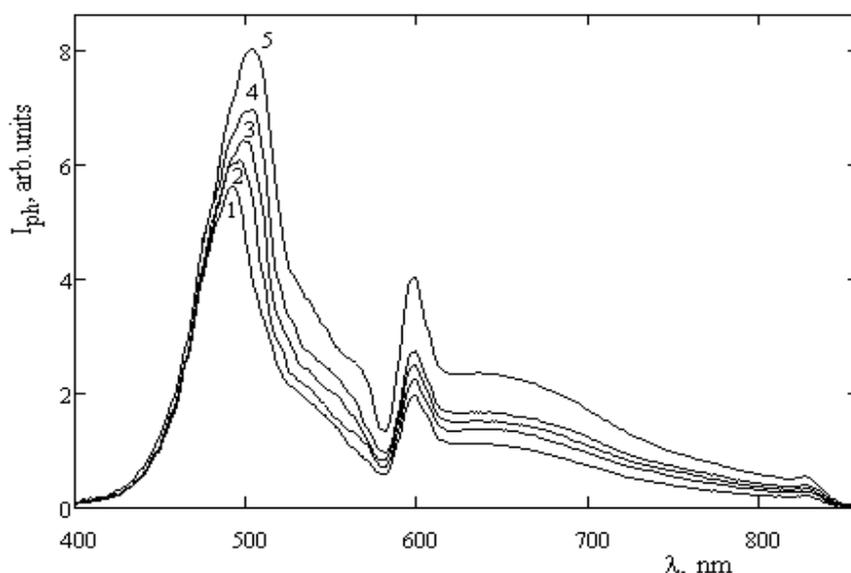


Рисунок 4 Спектральные характеристики фототока $p(\beta) - n(\alpha) - \text{ZnP}_2$ гетероперехода при напряжениях на структуре U, В: 1 – 10, 2 – 19, 3 – 25, 4 – 30.

Шоттки на α – и β – фазах ZnP_2 в этой области длин волн каких – либо особенностей не обнаружено.

Возможно, выше указанная особенность в спектрах фототока связана с мелким донором в тетрагональной модификации дифосфида цинка, с глубиной залегания 0.1 эВ [9],

однако выяснение природы полосы поглощения в этой области спектра требует дополнительных исследований. Исследования показали, что спектральная характеристика гетероперехода зависит от положения вектора поляризации и направления распространения света относительно кристаллографических плоскостей фаз в структуре. Поляризационная зависимость фототока в интервале длин волн 830 – 740 нм существенно меньше, чем в структурах металл – полупроводник, что объясняется геометрией границы раздела и направлением распространения света при освещении структуры. Исследования фототока в поляризованном свете в разных геометриях эксперимента показывают, что граница раздела в исследуемых переходах находится в плоскости, нормаль к которой является аксиальной направлениям [010] и [110] α и β модификаций дифосфида цинка соответственно.

Приложенное напряжение в заперном направлении увеличивает фототок, однако зависимости фототока от напряжения существенно отличаются для света из разных спектральных областей чувствительности структуры. При генерации неравновесных носителей заряда в ОПЗ β - фазы ZnP_2 светом с длиной волны $650 < \lambda < 860$ нм величина фототока растет пропорционально приложенному смещению практически во всем диапазоне напряжений. При освещении гетероперехода светом с длиной волны $\lambda < 650$ нм $J_{ph} = F(U)$ имеет сложный характер, быстрый рост тока при напряжениях $10 \text{ В} > U > 0 \text{ В}$, $U > 25 \text{ В}$ и линейную зависимость в интервале напряжений (10 – 25) В.

Дифференциальный показатель наклона m ($m = dJ_{ph}(U)/J_{ph}(U)dU$) является функцией напряжения, длины волны света и частоты модуляции светового потока и составляет (0.023 – 0.14) В^{-1} .

Частотные характеристики фототока определяются кинетикой неравновесных носителей заряда в α и β областях пространственного заряда гетероперехода. Зависимости фототока гетероперехода от частоты модуляции светового потока с длинами волн из разных участков его спектральной характеристики представлена на рис.5.

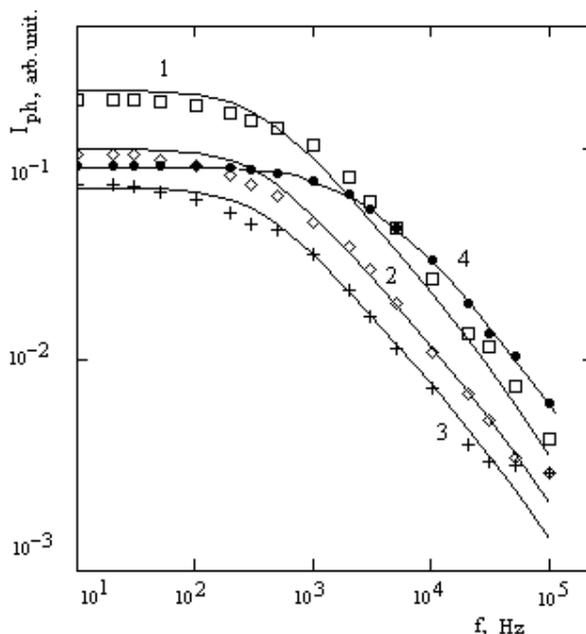


Рис.5 Частотные характеристики фототока $p(\beta) - n(\alpha) - \text{ZnP}_2$ на длине волны λ , nm: 1 – 460, 2 – 530, 3 – 600, 4 – 830.

При освещении светом с длинами волн $\lambda < 600$ нм, соответствующим поглощению в α области пространственного заряда перехода, фототок остается постоянным в полосе частот $f = 10 - 30$ Hz. При дальнейшем увеличении частоты модуляции

интенсивности света фототок уменьшается в соответствии с зависимостью $J_{ph} \sim I/f^n$. При освещении светом с длинами волн $860 > \lambda > 600$ нм, соответствующим поглощению в β – области пространственного заряда гетероперехода спад фототока в этой области частот происходит при частотах $f > 200$ Hz. Значения показателей степени n_1 и n_2 и граничных частот f_1 и f_2 , начиная с которых происходит спад частотной характеристики фототока, определяются свойствами α и β фаз ZnP_2 , не зависят от интенсивности света и незначительно изменяются от температуры и приложенного обратного смещения. Частоты f_1 и f_2 связаны с обратными значениями эффективных постоянных времени τ_{r1} и τ_{r2} , характеризующих скорости рекомбинации на границах ОПЗ с областями квазинейтральности. Значения τ_{r1} и τ_{r2} составляют $6 \cdot 10^{-4}$ и $9.5 \cdot 10^{-5}$ сек при 300 К соответственно.

IV. Заключение

Как следует из вышеизложенного, электрические и фотоэлектрические свойства анизотипного гетероперехода на структурных модификациях дифосфида цинка определяются рекомбинационными процессами в ОПЗ и на границах ОПЗ с областями квазинейтральности.

Результаты исследований указывают, что состав областей пространственного заряда перехода соответствует α и β – фазам ZnP_2 образующим гетеропереход, на границе раздела фаз отсутствуют переходные области другого состава, оказывающие существенное влияние на его характеристики, однако в электрических и фотоэлектрических свойствах гетероперехода обнаружены особенности, связанные, предположительно, с слоем низкой проводимости в ОПЗ β – фазы ZnP_2 .

Образование гетеропереходов $\alpha - \beta - ZnP_2$ в газовой фазе происходит в достаточно широком интервале температур и давлений паров компонентов, что позволяет создавать активные структуры с разнообразными фотоэлектрическими характеристиками.

IV. Библиография

1. С.И.Радауцан, Н.Н.Сырбу, И.Г.Стамов. Докл. АН СССР. **236**(1), 72, (1977).
2. К.Б.Алейникова, М.М.Афанасьев, И.Е.Занин. Журнал структурной химии, **50**, 723 (2009).
3. С.Ф.Маренкин, В.М.Трухан. Фосфиды, арсениды цинка и кадмия. (Минск: А.Н.Вараксин, 2010) гл.1, с.7.
4. Г.В.Жабее, А.П.Кудин, В.П.Тартачник. Физика и химия твердого тела. **3**(3), 404 (2002).
5. И.Г.Стамов, Д.В.Ткаченко. ФТП, **40**, 1196 (2006).
6. И.Г.Стамов, Д.В.Ткаченко. ФТП, **42**, 679 (2008).
7. О.В.Курносова, И.Н.Ясиевич. ФТП, **26**, 3307 (1984).
8. В.П. Карпус, В.И. Перель. ЖЭТФ, **91**, №6(12), 2319 (1986).
9. И.С.Горбань, А.Ф.Гуменюк, Г.А.Грищенко, А.К.Ткаченко, И.И.Тычина. ФТП, **12**, 1801 (1978).