

Султанов А.М.

НамИТИ, доцент, кафедра «физика», sulix80@mail.ru.

Абдулазизов Б.Т.

Наманганский Государственный Университет. bt_abdulazizov@mail.ru

**ССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ Mn ПРИМЕСА НА
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ p^0 - n^0 ГЕТЕРОПЕХОДОВ НА ОСНОВЕ
СЛАБОЛЕГИРОВАННОГО СЛОЯ GaAs.**

Аннотация. Проведены эксперименты и изучено влияние Mn примеси на высоковольтных p^0 - n^0 гетеропереходов на основе слаболегированного слоя арсенида-галлия. Исследовано влияние примеси Mn на место положения p^0 - n^0 перехода, определена концентрация и характер распределения основных и неосновных носителей заряда, диффузионная длина неосновных носителей заряда, подвижности носителей заряда, возникновения глубоких уровней в слаболегированном слое арсенида-галлия.

Ключевые слова. Гетеропереходы, высоковольтные p^0 - n^0 переходы, слаболегированные слои GaAs, диффузионная длина, и подвижности носителей заряда, глубокие уровни, акцепторные и донорные уровни.

Sultanov A.M.

NamITI, Associate Professor, Department of Physics. sulix80@mail.ru.

Abdulazizov B.T.

Namangan State University. E-mail: bt_abdulazizov@mail.ru

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF Mn IMPURITY ON HIGH-
VOLTAGE p^0 - n^0 HETEROJUNCTIONS BASED ON A LOW-DOPED GaAs
LAYER.**

Annotation. Experiments have been carried out and the influence of Mn impurity on high-voltage p^0 - n^0 heterojunctions based on a lightly doped gallium arsenide layer has been studied. The influence of Mn impurity on the position of

the p^0 - n^0 transition has been studied, the concentration and nature of the distribution of the main charge carriers have been determined, diffusion length of minority charge carriers, mobility of charge carriers, emergence of deep levels in a lightly doped gallium arsenide layer.

Keywords. *Heterojunctions, high-voltage p^0 - n^0 junctions, lightly doped GaAs layers, diffusion length, and mobility of charge carriers, deep levels, acceptor and donor levels.*

Введение. В современной микроэлектронике все большой интерес представляют применения больших сложных полупроводниковых структур, которые образуются при совместном использования разные химические элементы – гетероструктуры. Гетеропереходы, с различной шириной запрещенной зоны и различной степенью легирования, получили широкое практическое применение в излучающих и фотоэлектрических приборах (светодиоды, лазеры, фотодиоды и т.д.). Потенциальная яма, формируемая пиком в энергетической диаграмме перехода, позволяет увеличивать к.п.д. светоизлучающих электронных приборов.

Представляет интерес изучение влияния изовалентных атомов на процесс формирования плавных p^0 - n^0 переходов, поскольку их применение позволяет изменять уровень концентрации и спектр мелких примесей и глубоко уровневых ловушек за счёт взаимодействия с фоновыми примесями в расплаве и изменения собственных точечных дефектов в эпитаксиальных слоях.

Метод. В настоящее время широко используются эпитаксиальные методы получения монокристаллических слоев для изготовления различных полупроводниковых приборов [1]. Эпитаксиальные методы выращивания позволяют совместить во времени процесс кристаллизации полупроводникового материала и получение приборной структуры. Основное распространение получили газотранспортная, молекулярно-лучевая и жидкофазная эпитаксии (ЖФЭ). Идеальная стиковка

кристаллических решеток в полупроводниковый гетеропереход возможна при использовании ЖФЭ. Этот метод позволяет изготовить не только двухслойные но и многослойные гетероструктуры. Одним из наиболее перспективных направлений в бурно развивающейся области полупроводниковой микро-, опто- и наноэлектроники является разработка методов повышения совершенства гетероструктуры арсенида галлия и управление электрофизическими параметрами полупроводниковых приборов. Понимание роли примесей и возникающие при этом дефектов имеет решающее значение для объяснения ряда явлений от диффузии до односторонней инжекции, или для построения теории процессов, происходящих в легированных материалах. Различные исследования в области полупроводникового материаловедения, а именно изучение особенностей процессов взаимодействия различных примесей и дефектов в структуре полупроводника привели к необходимости создания и производства новых материалов с различными свойствами, что можно достичь за счёт легирования различными примесями. В связи с этим растет потребность в изучении процессов взаимодействия различных примесей и образования дефектов в слаболегированном слое арсенида галлия легированном примесями переходных металлов и редкоземельными элементами для разработки способов контролируемой стабилизации параметров полупроводниковых приборов. Несмотря на огромное количество экспериментальных результатов до сих пор остаются неизученными процессы формирования и развития дефектной структуры гетероструктуры арсенида галлия, легированного примесями переходных элементов. Целью данной работы является:

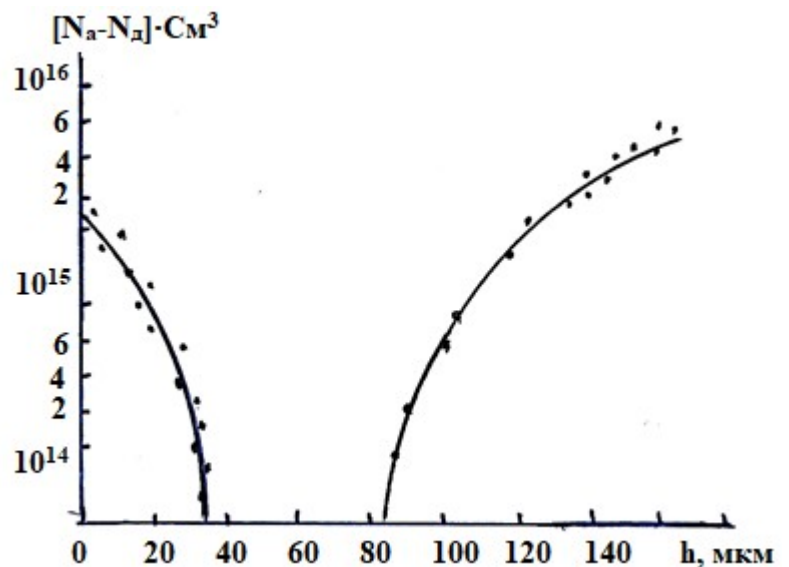
- определить место положения p^0 - n^0 переходов;
- определить концентрации и характер распределения основных носителей заряда слаболегированного слоя GaAs;
- определить диффузионные длины неосновных носителей заряда (ННЗ) в слаболегированных слоях GaAs;

- определить подвижности носителей заряда в слаболегированных эпитаксиальных слоях GaAs;
- изучить особенности поведения атомов Mn в GaAs и определить влияние технологических режимов легирования на параметры глубоких центров, образуемых этими примесями;
- изучить влияние атомов Mn и процессы термического дефектообразования в слаболегированных слоях GaAs;
- изучить процессы деградации глубоких центров в слаболегированных слоях GaAs при высоких температурах эксплуатации;
- изучить влияние дополнительно введенных примесей на процессы получения p^0-n^0 перехода в слаболегированных слоях GaAs.

Методика. Для решения поставленных задач использованы следующие методы: После выращивания эпитаксиальных структур в первую очередь определялись толщины слоев, их планарность и место положение p^0-n^0 перехода. Для определения местоположения p^0-n^0 перехода или области пространственного заряда (ОПЗ) использовался метод электрооптического эффекта [2]. Электрооптический эффект проявляется в возникновении двойного лучепреломления в электрическом поле. В случае эпитаксиальной структуры с p^0-n^0 переходом двойное лучепреломление должно возникать в ОПЗ за счёт индизирования оптической анизотропии на p^0-n^0 переходе. При исследованиях использовался микроскоп МИК – 5.

Для определения концентрации и характера распределения основных носителей заряда применялся вольт-ёмкостной метод с помощью ртутного зонда при послойном травлении слоев арсенида галлия. Типичная распределения концентрации носителей заряда в одном из полученных p^0-n^0 структурах показано на рис. -1.

Рис. - 1. Распределения концентрации носителей заряда в одном p^0-n^0 структурах.



Диффузионная

длина ННЗ является важнейших характеристик любого полупроводникового материала [5]. Для определения диффузионной длины ННЗ в слаболегированных слоях GaAs введенных примесями Mn и применялся способ изучения распределения тока, индуцированного электронным зондом малого диаметра, и определяется выражением

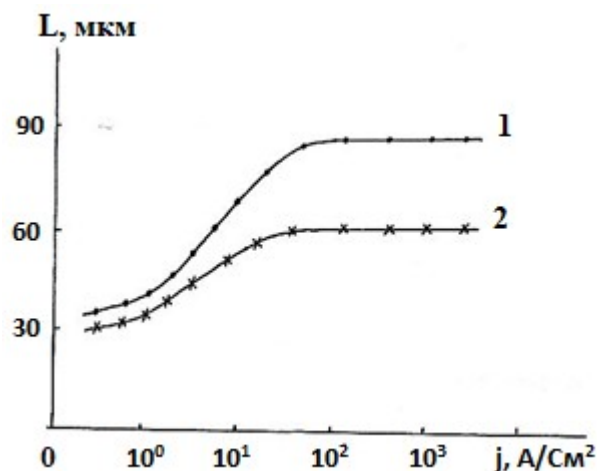
$$I = I_0 \exp \left(\frac{r_0 - x}{L_p} \right)$$

где x – расстояние от области возбуждения до p^0-n^0 пережога, r_0 – радиус области возбуждения.

Диффузионные длины L_d в p^0 – GaAs, определенные данным способом по наклону зависимости $L_{n1} = f(x)$, достигали $7 \div 10$ мкм при нулевом смещении и увеличивались до ≥ 90 мкм при $U_{обр} = 100$ В. Измерения проводился с помощью растрового электронного микроскопа микроанализатора jXA-5A. На рис. - 2.представлены зависимости диффузионной длины электронов от тока в слаболегированном слое p^0 – GaAs толщиной 40 мкм. Видно, что начиная плотностей тока $j > 50$ А/см², диффузионная длина L_n практически не меняется и достигает значений $75 \div 85$ мкм. Увеличение L_n в области меньших токов, по-видимому, связано с насыщением центров захвата электронов.

Рис. - 2. Типичные зависимости $L_n = f(j)$ в слоях $p^0 = \text{GaAs}$.

1 - $p^0 - 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$;
2 - $p^0 - 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.



Подвижности носителей заряда определялись измерением эффекта Холла в эпитаксиальных слоях, выращенных на полуизолирующих подложках.

Измерения проводились методом Ван-дер-Пау на образцах с шестью омическими контактами, полученными вплавлением индиевых капель в эпитаксиальный слой. Значения подвижности электронов в p^0 - GaAs слоях находятся в пределах $\approx 5000 \div 6000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$, а подвижности дырок в p^0 - p^0 - GaAs слоях $\approx 3000 \div 5000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$.

Результаты исследований подвижности основных носителей заряда в p^0 - областях, показали, что имеется высокая степень компенсации в эпитаксиальных слоях Рис. - 3.

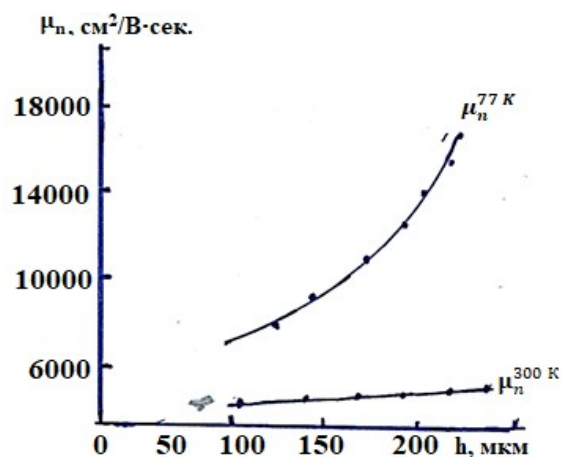


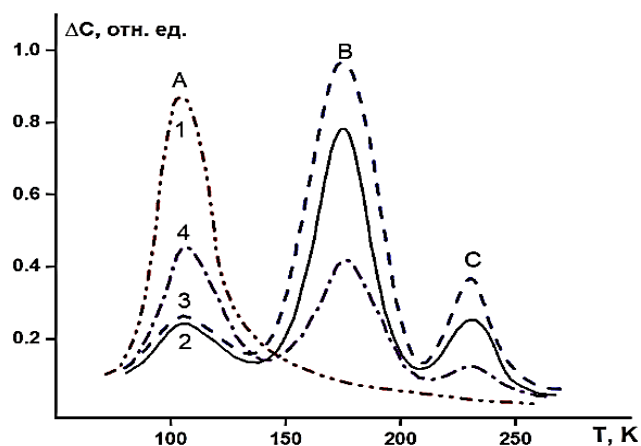
Рис. - 3. Подвижность электронов в слое слаболегированного GaAs.

Как следует из рисунка, степень компенсации в p^0 -слое возрастает по мере приближения к p^0 - p^0 переходу. Такой характер зависимости

подвижности может свидетельствовать о том, что суммарная концентрация зараженных центров в слое уменьшается с увеличением толщины p^0 -слоя и с уменьшением температуры кристаллизации слоя.

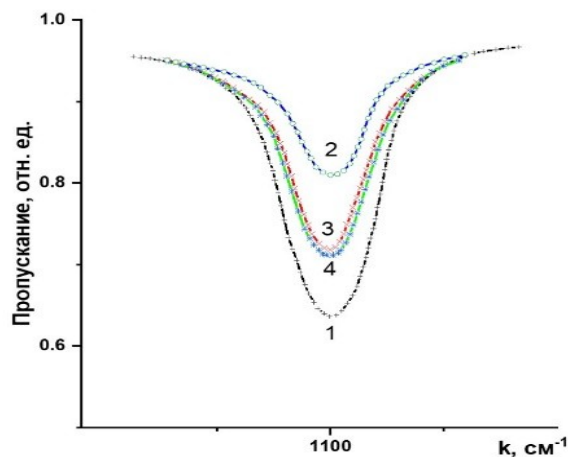
Для определения энергетических параметров глубоких уровней в слаболегированных слоях введенных примесями Mn и использовались метод нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) и фотоемкости (ФЕ). Во всех слоях, полученных методом ЖФЭ помимо мелких акцепторных и донорных уровней обнаружено глубокие уровни A($E_c + 0,4$ эВ), B($E_c + 0,54$ эВ), C($E_c + 68$ эВ) рис. - 4. Сечения захвата глубоких уровней при этом соответствует значениям $\sigma = 8 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$, $6 \cdot 10^{13} \text{ См}^2$, $4 \cdot 10^{-17} \text{ См}^2$. В литературе эти уровни обозначаются HL5, HL3, HL2 [3-4].

Рис.-4. DLTS спектр один из образцов легированный примесью Mn.



Рекомбинационные свойства p^0 -области в значительной степени определяются глубокими акцепторными A и B центрами.

Рис. - 5. Спектр ИК-поглощения легированный Mn при различных рабочих температур.

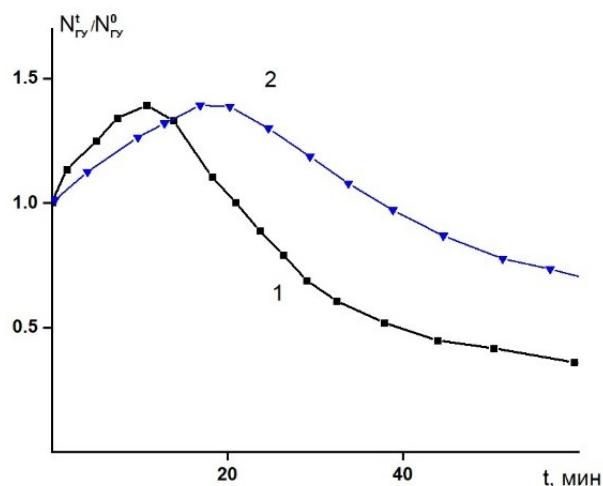


При этом основную роль эти центры играют в p – части p^0 -области. В p^0 - GaAs они, обнаруженные методом ёмкостной спектроскопии (LLTS) приписываемые к дефектом роста, являются ловушками для дырок, причем концентрация их падает экспоненциально с уменьшением температуры роста. Спектр ИК - поглощения этих образцов, легированный Mn примесью при температуры от 20 °С до 200 °С представлены на рис. - 5, а кинетика влияния температуры в интервале от 20 °С до 200 °С на глубоких уровней показано в рис. - 6.

Наряду с мелкими акцепторами и мелкими донорами, глубокие акцепторы определяют положение p^0 - n^0 перехода и размеры ОПЗ [6]. Часть p^0 -слоя примыкающая к подложке, имеет сравнительно высокую концентрацию мелких акцепторов, большую, чем концентрация мелких доноров и глубоких акцепторов. По мере смещения от подложки вглубь слоя у разность $N_{д.м.} - N_{м.а.}$ уменьшается, а затем становится равной нулю и меняет знак, однако, за счёт наличия глубоких акцепторов, тип проводимости слоя не меняется.

Если $0 < N_{д.м.} - N_{а.м.} < N_{а.г.}$, то уровень Ферми будет близок к положению первого глубокого акцепторного уровня – А. При дальнейшем смещении вглубь слоя, когда $N_{а.г.} < N_{д.м.} - N_{а.м.} < N_{а.г.}$, уровень Ферми будет приближаться к положению второго уровне – В и дальше третьего уровне – С.

Рис. - 6. Кинетика влияния рабочих температуры на ГУ образцах легированных Mn.



Оценки показывают, что удельное сопротивление области неполюной ионизации центров с уровнями А, В и С при 300 К составляет 10^6 Ом·см и более. Координата слоя, где $N_{д.м.} = N_{а.м.} + 2N_{а.г.}$ есть место положения p^0 - n^0 перехода. Далее в слое n^0 – типа концентрация электронов будет определяться снижением $N_{д.м.} - N_{а.г.}$. Поэтому p^0 – область состоит из двух частей низкоомной p^0 – и высокоомной i – части, а p^0 - n^0 переход находится на границе i - и n^0 – области.

Заключения. В заключение отметим, что

- Определены места положения p^0 - n^0 перехода или области пространственного заряда слаболегированного слоя GaAs легированного Mn примесями. Толщина p^0 -области обеспечивают значения коэффициента передачи и рекомбинационные свойства получаемых p^0 - n^0 переходов [7,9].
- Изучены характер и профиль распределения концентрации основных носителей заряда. Концентрация носителей в p^0 - и n^0 – областях лежала в пределах от $1 \cdot 10^{15}$ до $0,1 \cdot 10^{15}$ См⁻³ [7].
- Определены подвижность носителей заряда. Подвижность носителей заряда составляла, в n^0 - слое $\mu_n \approx (5 \div 6) \cdot 10^3$ См²/В·сек, и p^0 - слое $\mu_p \approx (400 \div 450)$ См²/В·сек [7,10].
- Определены диффузионные длины ННЗ в слаболегированных слоях GaAs легированного Mn примесями [8,13];
- Проведено комплексное исследование свойств слаболегированного слоя GaAs, легированного примесями Mn и установлено, что эти примеси образуют глубокие уровни с энергиями ионизации $E_c - 0,4$ эВ, $E_c - 0,54$ эВ, $E_c = 0,68$ эВ в n^0 -GaAs <Mn> [7,8]
- Исследованы процессы влияния глубоких центров, создаваемых примесями Mn и установлено, что примеси нестабильны в решетке арсенида галлия при изменения рабочих температур и кинетика влияния температуры на глубоких уровнях носит нелинейный характер [11,12].

Использованные литературы:

- [1] Зи. С. 1984. Физика полупроводниковых приборов. Т.2. М. Мир.
- [2] Войтович В., Думаневич А. 2009. Чем заменить SiC диоды Шотки. // Силовая электроника, № 5.
- [3] Войтович В., Гордеев А., Думаневич А. 2009. GaAs – диоды для PFC, SMPS, UPS, IPM Solar Invertors и замены синхронных выпрямителей // 2 Силовая электроника № 6.
- [4] Саркат Т., Мазумдер С.К. Маршировать. 2007. Эпитаксиальное проектирование силового устройства с боковым суперпереходом на основе гетероструктуры с прямым оптическим управлением GaAs/AlGaAs для быстрого повторяющегося переключения // Транзакции IEEE на электронных устройствах. Том. 54. № 3.
- [5] Вайнштейн С.Н., Юферев В.С., Костомоваара Ю.Т., Кулагина М.М., Мойланен.Х.Т. 2010. Существенное влияние площади эмиттера на эффективность, стабильность и надежность пикосекундного переключения в структуре биполярного транзистора GaAs // Транзакции IEEE на электронных устройствах. Том 57, № 4.
- [6] Уджи Т., Нишиде Р. 1972. Исследования фотоемкости на глубоких уровнях в эпитаксиальных слоях жидкой фазы GaAs и AlGaAs. Джей Джей Прил. Физ. т.15, № 11., 2247-2248.
- [7] Султанов А.М. Монография. 2022. Разработка технологии создания и исследование фотонно-инжекционных коммутаторов на основе гетероструктур GaAs-AlGaAs. Наманган, Usmon Nosir Media, 116 стр.
- [8] А. М. ¹Sultanov, J. Z. ²Mirzarayimov. 2024. MAIN TECHNOLOGICAL FACTORS AFFECTING THE PROPERTIES OF LOW-DOPED LAYERS AND TRANSISTOR $n^+p^0n^0$ STRUCTURES. European Journal of Emerging Technology and Discoveries ISSN €: 2938-3617, Volume 2, Issue 3. March.
- ¹Namangan Institute of Engineering and Technology, Namangan, Uzbekistan.
- ²Republic of Uzbekistan the Ministry of Internal Affairs Namangan academic Lyceum.

- [9]Sultanov A.M., Abdukarimov A.A., Kufian M.Z. 2023. Development of technology for creating high-voltage p^0 - n^0 junctions based in GaAs. BULLITIN OF THE KARAGANDA UNIVERSITY. PHYSICS series № 4 (112). pp. 50-56.
- [10] ¹Рожков А.В., ²Султанов А.М. 2023. Исследование влияние технологических факторов на высоковольтных p^0 – n^0 переходов на основе GaAs-AlGaAs. «ТРЕТИЙ РЕНЕССАНС В УЗБЕКИСТАНЕ И ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ» Международная научно-практическая онлайн конференция. Издательство «Хаёт нашри-2020» г. Андижан.
- [11] A.M. Sultanov¹, E.K. Yusupov², R.G. Rakhimov². 2024. Investigation of the Influence of Technological Factors on High-Voltage p^0 – n^0 Junctions Based on GaAs. Journal of Nano- and Electronic Physics. vol 16, № 16 01010 (5 pp). Namangan Institute of Engineering and Technology, 160115 Namangan, Uzbekistan.
- [12] A.M. ¹Султанов, Ж.З. ²Мирзарайимов. 2024. УДК 538.915 621.315.592 ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОТОННО – ИНЖЕКЦИОННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ТИРИСТОРОВ ДЛЯ МОДУЛЯЦИИ УСИЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРО ЛАЗЕРОВ. ¹Namangan Institute of Engineering and Technology, Namangan, Uzbekistan. ²Republic of Uzbekistan the Ministry of Internal Affairs Namangan academic Lyceum.
- [13] ¹Рожков А.В., ²Султанов А.М. 2023. Исследование влияние технологических факторов на высоковольтных p^0 – n^0 переходов на основе GaAs-AlGaAs. «ТРЕТИЙ РЕНЕССАНС В УЗБЕКИСТАНЕ И ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ» Международная научно-практическая онлайн конференция. Издательство «Хаёт нашри-2020» г. Андижан.