

УДК [621.382.3](#)

Эшонкулов А.А.

ассистент кафедры «Радиоэлектроника»

Джизакский политехнический институт

ПРИБОРЫ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТРАНЗИСТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ

Аннотация: В данной статье полностью раскрыта физическая сущность устройств на основе гетероструктур и перспективных транзисторных структур, сравниваются и анализируются характеристики устройств на основе гетероструктур и перспективных транзисторных структур.

Ключевые слова: GaAs-гетероструктура, DA-DpHEMT, нанопленка.

ESHONKULOV A.A.

Assistant at the Department of Radioelectronics

Jizzakh Polytechnic Institute

DEVICES BASED ON HETEROSTRUCTURES AND PROMISING TRANSISTOR STRUCTURES

Annotation. This article fully reveals the physical essence of devices based on heterostructures and promising transistor structures, compares and analyzes the characteristics of devices based on heterostructures and promising transistor structures.

Keywords: GaAs heterostructure, DA-DpHEMT, nanofilm.

Введение

Гетеропереходы Активное продвижение мощных полупроводниковых приборов в миллиметровый диапазон длин волн связано, в основном, с совершенствованием эпитаксиальных технологий нитрида галлия. В миллиметровом диапазоне длин волн полевые транзисторы на основе AlGaN – GaN гетероструктур демонстрируют

крайне впечатляющие характеристики и продвинулись почти до терагерц [1]. В то же время, одним из основных недостатков мощных нитридгаллиевых приборов являются высокий уровень нелинейности, и он до сих пор не устранён. Промышленное применение таких приборов на частотах заметно выше 100 ГГц выглядит пока достаточно проблематичным. Кроме того, существует высокая вероятность того, что типовые транзисторы на гетероструктурах на основе GaN без появления принципиально новых технических решений достигли своего максимума в предельных частотах [2]. В свою очередь, при проектировании транзисторов на основе GaAs псевдоморфных гетероструктур имеются возможности существенного улучшения их характеристик - увеличения удельной выходной мощности, коэффициента усиления и предельных частот. В России в 2012 г. был создан новый тип транзисторных гетероструктур: гетероструктуры с донорно – акцепторным легированием (DA-DpHEMT) [3,4]. Донорно-акцепторное легирование позволило сформировать у границ квантовой ямы дополнительные потенциальные барьеры, оптимизированные для уменьшения поперечного пространственного переноса электронов и увеличения эффекта размерного квантования. Первые результаты разработки мощных полевых транзисторов на GaAs гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием продемонстрировали двукратное увеличение удельной мощности транзисторов, а также рост малосигнального коэффициента усиления на 3 – 4 дБ [5]. В 2020 году транспортные свойства псевдоморфных AlGaAs/GaAs/InGaAs гетероструктур с двухсторонним донорно – акцепторным легированием DA-DpHEMT были существенно улучшены за счет введения дополнительных цифровых потенциальных барьеров из AlAs/GaAs короткопериодных сверхрешеток вокруг легированных областей. 123 В работе приведены результаты теоретических исследований применения цифровых барьеров для

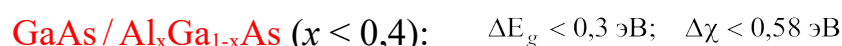
улучшения характеристик GaAs псевдоморфных транзисторных гетероструктур. Расчеты производились по модели, представленной в [6] для следующих гетероструктур: с двухсторонним донорно-акцепторным легированием и системами чередующихся тонких слоев AlAs/GaAs, образующих дополнительные цифровые потенциальные барьеры; обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами; двухканальных гетероструктур с донорно – акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами [7].

В гетеропереходах *p*- и *n*-области сформированы из полупроводников с различной шириной запрещенной зоны. Необходимое условие — одинаковый тип решетки, близкие периоды решетки (a_0) и близкие ТКН.

Таблица 1.1. Параметры некоторых полупроводников, пригодных для создания гетеропереходов

Полупроводник	A ^{III} B ^V						A ^{IV}		
	GaAs	InAs	nP	nAs	nSb	aSb	e	i	
Тип решетки	Цинковая обманка						Алмаз		
Период решетки a_0 , нм	5,65	5,66	5,87	6,06	6,48	6,1	5,65	5,43	
Электронное сродство χ , эВ	4,07	2,62	5,34	4,9	4,59	4,1	4,13	4,01	
Ширина запрещенной зоны E_g , эВ	1,43	2,16	1,35	0,36	0,18	0,73	0,66	1,12	
Положение E_c в зоне Бриллюэна	Г	X	Г	Г	Г	Г	L	Δ	
Эффективные массы	m_n/m_0	0,07	0,78	0,08	0,023	0,01	0,04	0,55	1,18
	m_p/m_0	0,57	0,86	0,74	0,41	0,41	0,44	0,2	0,8

Хорошие пары:



В зависимости от соотношения знаков ΔE_c и ΔE_v различают гетеропереходы I-го и II-го рода:

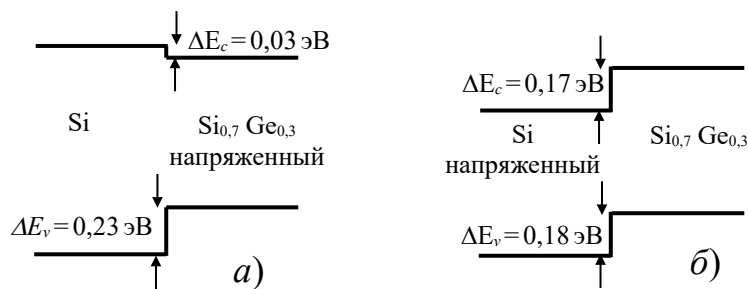


Рис. 1.1. Энергетические диаграммы гетеропереходов Si/Si_{0,7}Ge_{0,3}:

a – напряженный слой Si_{0,7}Ge_{0,3}; края зон смещаются в противоположных направлениях; *б* – напряженный слой Si; края зон смещаются в одном направлении.

Простейшая модель гетероперехода предполагает, что уровень энергии свободного электрона на гетеропереходе непрерывен и разрыв зоны проводимости определяется разностью электронных средств полупроводников [8] (модель Андерсона):

$$\begin{cases} \Delta E_c = \Delta\chi \\ \Delta E_v = \Delta E_g - \Delta\chi \end{cases}$$

Реально величина разрыва зон зависит от механизма формирования межатомных связей на границе раздела и может быть как больше, так и меньше величины $\Delta\chi$.

Ввиду чрезвычайно малой эффективной массы электронов (и, следовательно, высокой подвижности) в Индии весьма перспективными для гетеропереходных транзисторов являются тройные полупроводниковые соединения InGaAs, InGaP, InAlAs и InP (табл. 7.1). Введение индия в GaAs существенно повышает подвижность электронов [9,10]. В соединении In_xGa_{1-x}As подвижность электронов возрастает с увеличением мольной доли In x примерно по закону $\mu_n \approx 5000(1 + 2x)$ см²/В·с. Постоянные решетки InGaAs, InGaP, InAlAs и InP-подложки хорошо согласуются, что позволяет довести мольную долю In до $x \approx 0,6$ и

увеличить подвижность электронов при 300 К примерно вдвое. Введение In в GaAs сужает запрещенную зону, причем разрыв зоны проводимости в гетероструктуре $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{GaAs}$ составляет около 0,5В (вдвое больше, чем в $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}/\text{GaAs}$) [11].

Рассогласование постоянных решетки Ge и Si составляет 4,2%, что вызывает механические напряжения в более тонком слое гетероструктуры. На рисунке 7.1 показаны энергетические диаграммы гетеропереходов Si/Si_{0,7}Ge_{0,3}, в которых напряженными являются слои Si/Si_{0,7}Ge_{0,3} (а) или Si (б) [12,13]. В последнем случае разрывы зоны проводимости и валентной зоны примерно одинаковы при почти одинаковой ширине запрещенной зоны ($\Delta E_g = 0,1$ эВ), что позволяет создавать на ее основе комплементарные пары полевых транзисторов с высокими подвижностями как электронов, так и дырок в канале: $\mu_n = 1270-2830$ см²/В·с, $\mu_p = 800 - 1000$ см²/В·с.

Наиболее совершенными технологическими методами изготовления гетеропереходов являются молекулярно-лучевая эпитаксия (МВЕ), позволяющая создавать сверхтонкие (вплоть до моноатомных) полупроводниковые слои, и эпитаксия металлоорганических соединений из газовой фазы (МОСVD) [14].

Сшивка энергетических диаграмм:

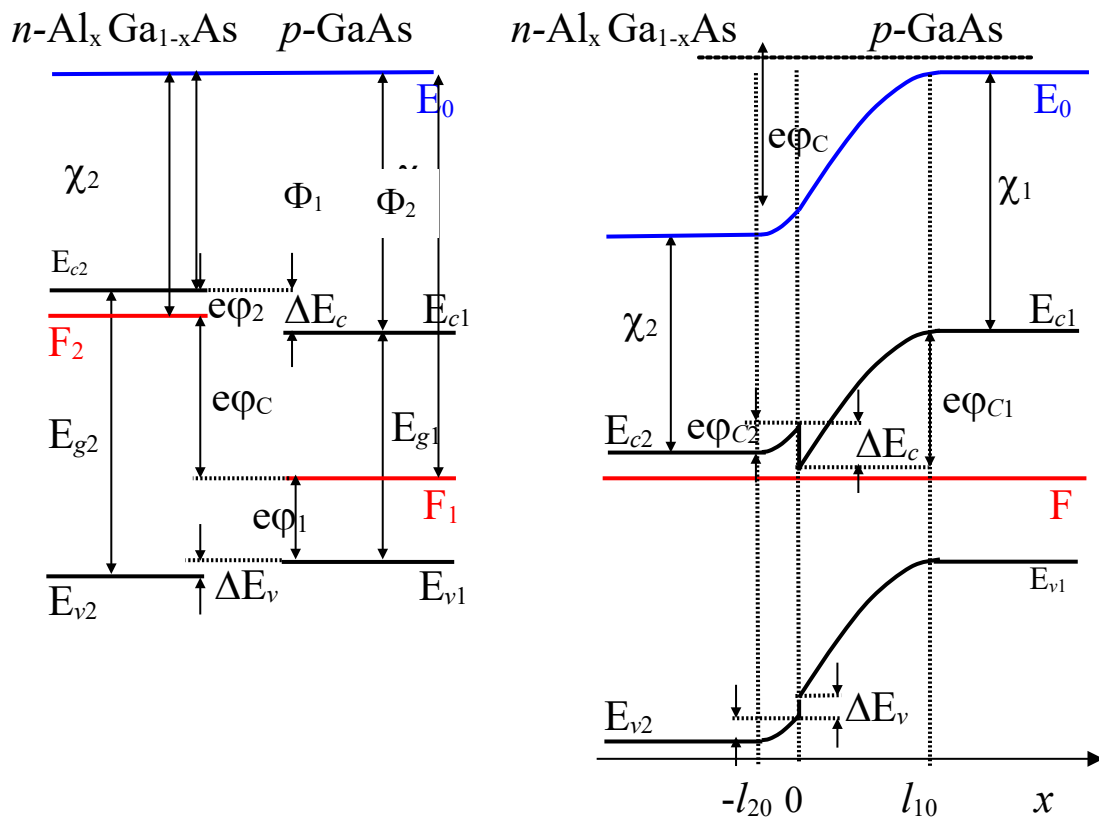


Рис.1.2 Зонные диаграммы полупроводников $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $p\text{-GaAs}$ (а) и равновесная энергетическая диаграмма $p\text{-}n$ перехода $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - p\text{-GaAs}$ (б).

Суммарный разрыв запрещенной зоны складывается из разрыва зоны проводимости и разрыва валентной зоны:

$$\Delta E_g = \Delta E_c - \Delta E_v.$$

В первом приближении разрыв зоны проводимости, как и ΔE_g , пропорционален мольной доле гетерокомпонента [15]:

$$\Delta E_c + x\Delta E_{c0}.$$

При отсутствии вырождения расстояния $\Phi_{1,2}$ между уровнем Ферми и ближайшей к нему границей запрещенной зоны в электронейтральных областях определяются степенью их легирования (концентрации примеси N_1 и N_2 предполагаются постоянными) [16]:

$$p_{10} = N_1 = N_{v1} e^{-\Phi_1/\Phi_T}; \quad \Phi_1 = \Phi_T \ln(N_{v1}/N_1); \quad (1.1a)$$

$$n_{20} = N_2 = N_{c2} e^{-\varphi_2 / \varphi_T}; \quad \varphi_2 = \varphi_T \ln(N_{c2} / N_2). \quad (1.16)$$

Контактная разность потенциалов определяется из левого рисунка 7.2 и (1.1):

$$\begin{aligned} \varphi_C &= (F_2 - F_1) / e; & \varphi_C &= (E_{g1} + \Delta E_c) / e - (\varphi_1 + \varphi_2). \\ \varphi_C &= (E_{g1} + \Delta E_c) / e - \varphi_T \ln(N_{v1} N_{c2} / N_1 N_2). \end{aligned} \quad (1.2)$$

Двойное интегрирование уравнений Пуассона в p - и n - областях ОПЗ дает:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{C1} &= e N_1 l_{10}^2 / 2 \varepsilon_1 \varepsilon_0; \\ \varphi_{C2} &= e N_2 l_{20}^2 / 2 \varepsilon_2 \varepsilon_0; \\ \varphi_C &= \varphi_{C1} + \varphi_{C2}; \end{aligned} \right\} \varphi_C = e (N_1 l_{10}^2 / \varepsilon_1 + N_2 l_{20}^2 / \varepsilon_2) / 2 \varepsilon_0. \quad (1.3)$$

$$\text{Суммарный заряд в ОПЗ равен нулю:} \quad N_1 l_{10} = N_2 l_{20}. \quad (1.4)$$

Из (1.3) и (1.4) можно найти l_{10} и l_{20} . Замена $\varphi_C \rightarrow \varphi_C - V$ дает значения l_1 , l_2 и $l = l_1 + l_2$ при напряжении на переходе V :

$$l(V) = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_0 (\varphi_C - V)}{e} \cdot \frac{(N_1 + N_2)^2}{N_1 N_2 (N_1 / \varepsilon_1 + N_2 / \varepsilon_2)}}; \quad (1.5a)$$

$$l(V) \approx \sqrt{\frac{2 \varepsilon_0 \varepsilon (\varphi_C - V)}{e} \cdot (N_1^{-1} + N_2^{-1})}; \quad (1.5b)$$

$$l_1(V) = l(V) N_2 / (N_1 + N_2); \quad (1.6a) \quad l_2(V) = l(V) N_1 / (N_1 + N_2); \quad (1.6b)$$

Приближение (1.5б) соответствует обычно выполненному условию $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2 \approx \varepsilon$.

Формулы (1.5б) и (1.6а,б) совпадают с аналогичными формулами для гомогенного ступенчатого перехода.

Список литературы

1. Mustofoqulov, J. A., & Bobonov, D. T. L. (2021). "MAPLE" DA SO'NUVCHI ELEKTROMAGNIT TEBRANISHLARNING MATEMATIK TAMLILI. *Academic research in educational sciences*, 2(10), 374-379.

2. Mustofoqulov, J. A., Hamzaev, A. I., & Suyarova, M. X. (2021). RLC ZANJIRINING MATEMATIK MODELI VA UNI "MULTISIM" DA HISOBLASH. *Academic research in educational sciences*, 2(11), 1615-1621.
3. Иняминов, Ю. А., Хамзаев, А. И. У., & Абдиев, Х. Э. У. (2021). Передающее устройство асинхронно-циклической системы. *Scientific progress*, 2(6), 204-207.
4. Каршибоев, Ш. А., Муртазин, Э. Р., & Файзуллаев, М. (2023). ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ. *Экономика и социум*, (4-1 (107)), 678-681.
5. Мулданов, Ф. Р., Умаров, Б. К. У., & Бобонов, Д. Т. (2022). РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЙ, АЛГОРИТМА И ЕГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА. *Universum: технические науки*, (11-3 (104)), 13-16.
6. Мулданов, Ф. Р., & Иняминов, Й. О. (2023). МАТЕМАТИЧЕСКОЕ, АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ РОБОТА-АНАЛИЗАТОРА В ВИДЕОТЕХНОЛОГИЯХ. *Экономика и социум*, (3-2 (106)), 793-798.
7. Ирисбоев, Ф. Б., Эшонкулов, А. А. У., & Исломов, М. Х. У. (2022). ПОКАЗАТЕЛИ МНОГОКАСКАДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ. *Universum: технические науки*, (11-3 (104)), 5-8.
8. Zhabbor, M., Matluba, S., & Farrukh, Y. (2022). STAGES OF DESIGNING A TWO-CASCADE AMPLIFIER CIRCUIT IN THE "MULTISIM" PROGRAMM. *Universum: технические науки*, (11-8 (104)), 43-47.
9. Каршибоев, Ш., & Муртазин, Э. Р. (2022). ТИПЫ РАДИО АНТЕНН. *Universum: технические науки*, (11-3 (104)), 9-12.
10. Омонов С.Р., & Ирисбоев Ф.М. (2023). АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА ЭМС

НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ R&S ELEKTRA. Экономика и социум, (5-1 (108)), 670-677.

11. Саттаров Сергей Абудиевич, & Омонов Сардор Рахмонкул Угли (2022). ИЗМЕРЕНИЯ ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА FPC1500. *Universum: технические науки*, (11-3 (104)), 17-20.

12. Якименко, И. В., Каршибоев, Ш. А., & Муртазин, Э. Р. (2023). Джизакский политехнический институт СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ РАДИОЧАСТОТ. Экономика и социум, 1196.

13. Абдиев, Х., Умаров, Б., & Тоштемиров, Д. (2021). Структура и принципы солнечных коллекторов. In *НАУКА И СОВРЕМЕННОЕ ОБЩЕСТВО: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ, ДОСТИЖЕНИЯ И ИННОВАЦИИ* (pp. 9-13).

14. Раббимов, Э. А., & Иняминов, Ю. О. (2022). ВЛИЯНИЕ ОКИСНОЙ ПЛЕНКИ НА КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПЫЛЕНИЯ КРЕМНИЯ. *Universum: технические науки*, (11-6 (104)), 25-27.

15. Mustafaqulov, A. A., Sattarov, S. A., & Adilov, N. H. (2002). Structure and properties of crystals of the quartz which has been growth up on neutron irradiated seeds. In *Abstracts of 2. Eurasian Conference on Nuclear Science and its Application*.

16. Раббимов, Э. А., Жўраева, Н. М., & Ахмаджонова, У. Т. (2020). Влияние окисной пленки на коэффициенты распыления кремния. *Экономика и социум*, (6-2 (73)), 187-189.

17. Yuldashev, F. (2023). HARORATI MOBIL ELEKTRON QURILMALAR ASOSIDA NAZORAT QILINADIGAN QUYOSH QOZONI. *Interpretation and researches*, 1(1).