

Моделирование характеристик p - n структуры в GaAs полученной имплантацией ионов Ar^+ с энергией 2,5 кэВ

И.А. Толкачев¹, Е.А. Макаревская², К.К. Прудченко², Е.В. Контрош², В.С. Калиновский²,
В.М. Микушкин²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Аннотация: в настоящей работе приводятся результаты исследования вольт-амперных характеристик структур, которые были получены имплантацией ионов аргона низких энергий. В программном пакете “*Silvaco Atlas*” TCAD было выполнено математическое моделирование имплантированных ионами аргона n -GaAs структур. Были проанализированы экспериментальные и расчётные темновые вольт-амперные характеристики. Проведённый анализ показал хорошее совпадение расчётных и экспериментальных характеристик и наличие в имплантированных структурах мелкозалегающего p - n перехода.

Ключевые слова: имплантация, ионы аргона, GaAs, вольт-амперная характеристика, p - n переход, программа “*Silvaco Atlas*” TCAD

1. Введение

В настоящее время существуют такие ростовые технологии полупроводниковых p - n структур, как жидкофазная эпитаксия, газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (МОС-гидридная эпитаксия) и молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ). Одним из возможных методов создания p - n перехода в полупроводниковых структурах является так же ионная имплантация [1 – 4]. Данный метод активно применяется в качестве очистки поверхности полупроводника перед эпитаксиальным ростом структур. В настоящее время низкоэнергетичными ионами аргона очищают поверхность различных полупроводниковых материалов. Однако не всегда учитывается тот факт, что ионы низких энергий, создавая в поверхностном слое очищаемого образца дефекты кристаллической решётки, могут изменить тип проводимости и соответственно его свойства.

Данная работа посвящена исследованию темновых ВАХ структур на основе n -GaAs, облучённых ионами аргона с энергией 2,5 кэВ. Представлены результаты моделирования характеристик имплантированных структур и выполнено сравнение с экспериментальными характеристиками. Математическое моделирование производилось с помощью программного пакета “*Silvaco Atlas*” TCAD [5 – 6].

2. Облучение и моделирование структур

Имплантация ионов аргона (Ar^+) осуществлялась в сверхвысоковакуумной установке с базовым остаточным давлением $\sim 5 \cdot 10^{-10}$ Торр в пластину n -типа GaAs (100) легированную Si ($N_D \leq 10^{18}$ см⁻³). Энергия ионов и флюенс пучка составляли соответственно 2,5 кэВ и $F_i \sim 10^{15}$ см². Ионами аргона удалялся естественный оксидный слой и создавался высокодефектный p -слой толщиной $d_x \sim 8$ нм [1]. Толщина имплантированного слоя определялась как полная ширина при половине высоты максимума ($FWHM$) профиля имплантированных ионов, рассчитанного с помощью программы *SRIM* (*The Stopping and Range of Ions in Matter*). Величина $FWHM$ примерно

в два раза превышает табулированную проекционную глубину проникновения ионов R_p , которая соответствует максимальной концентрации имплантированных ионов в n -GaAs (100). На рисунке 1 схематически показана структура до и после облучения ионами аргона.

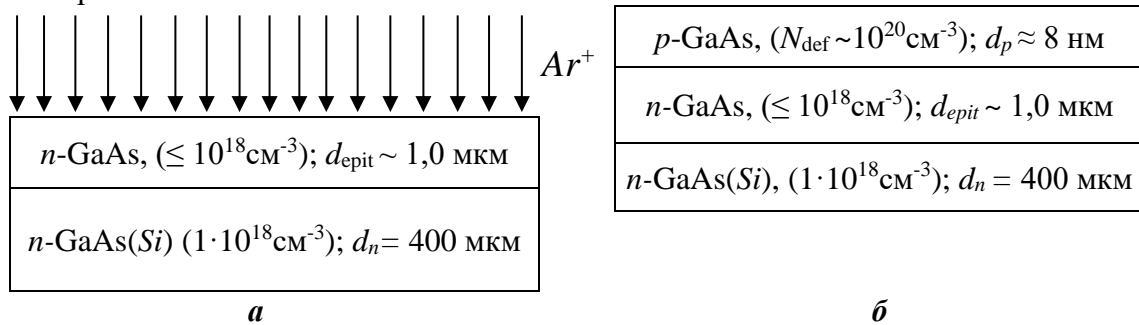


Рисунок 1. Структуры GaAs: **a**) – до облучения и **б**) – после облучения ионами аргона (Ar^+) с энергией 2,5 кэВ.

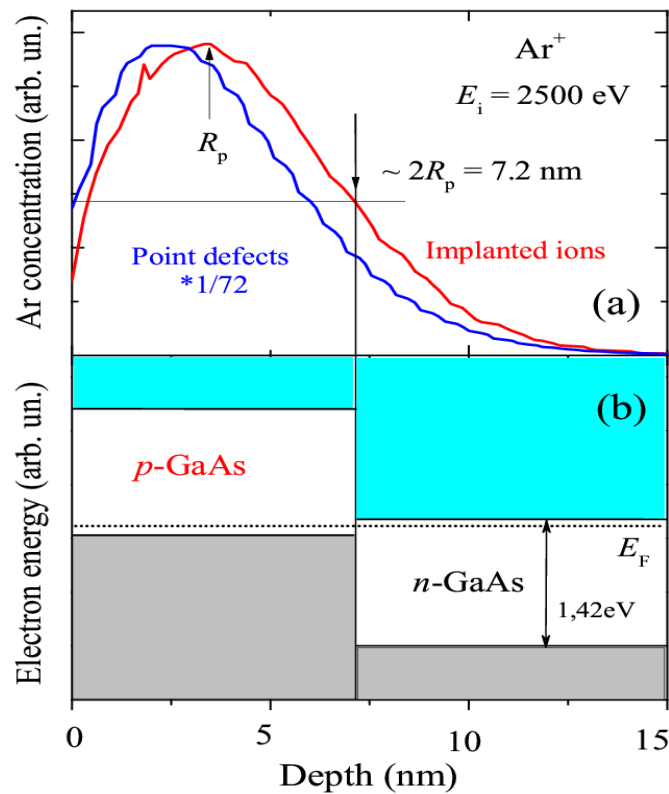


Рисунок 2. **a**) Распределения имплантированных ионов Ar^+ по глубине n -GaAs (100), (SRIM) и концентрации созданных при имплантации точечных дефектов; **б**) Зонная диаграмма p - n -GaAs структуры сформированной облучением ионами Ar^+ в n -GaAs (100).

В программе “*Silvaco Atlas*”, была смоделирована структура аналогичная n -GaAs, имплантированного ионами аргона (рисунок 1, **б**) с p -слоем GaAs толщиной $\sim 8 \text{ нм}$, плотностью дефектов $N_{def} \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (рисунок 2, **a**) и были рассчитаны прямые темновые ВАХ, (рисунок 3, **a** и **б**; кривая 3). Для вычисления параметров характеризующих доминирующие механизмы токопрохождения в исследуемых p - n -GaAs структурах, используя значения, приведённые в таблицах 1 и 2, по 3-х экспоненциальной модели [7] был проведён фиттинг расчётных темновых ВАХ,

(рисунок 3, *a* и *б*; кривая 4). Параметры, полученные из фитинга темновых ВАХ для смоделированных структур, приведены в таблице 3. В таблице 3 даны значения диодных коэффициентов (коэффициентов идеальности) - A_i и предэкспоненциальных множителей (токов “насыщения”) - J_{0r} , J_{0d} , соответствующих рекомбинационному, с $A_r = 2$, и для диффузионного, $A_d = 1$ механизмов токопрохождения, а также значения сопротивления образцов облучённой структуры - R_S .

Таблица 1. Параметры ловушек, используемых в расчётах ВАХ по программе “Silvaco” для образцов структуры, облучённой 2,5 кэВ ионами Ar^+

Номер образца	Слой	Вид примеси	E_T , эВ	σ_n , см ²	σ_p , см ²	N_T , см ⁻³
1	<i>p</i> -GaAs	донорная	0,715	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{20}$
	<i>n</i> -GaAs	акцепторная	0,715	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{16}$
2	<i>p</i> -GaAs	донорная	0,715	$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$5,5 \cdot 10^{19}$
	<i>n</i> -GaAs	акцепторная	0,715	$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{16}$

Таблица 2. Параметры для структуры *n*-GaAs при температуре $T = 300$ К используемые в расчёте по программе “Silvaco”

E	E_G , эВ	χ , эВ	μ_{0n} , см ² /В·с	μ_{0p} , см ² /В·с	N_c , см ⁻³	N_v , см ⁻³
12,9	1,424	4,07	8500	400	$4,7 \cdot 10^{17}$	$9 \cdot 10^{18}$

3. Экспериментальные ВАХ и результаты измерений

Измерения темновых ВАХ проводились по четырёхзондовой схеме при комнатной температуре на установке, включающей в себя: экранированную зондовую станцию MDC; оптический микроскоп МБС-10; электрические зонды с микроподвижками; источник-измеритель Keithley 2635A; блок питания осветителя микроскопа; персональный компьютер со специальной управляющей программой.

Измеренные темновые ВАХ *p-n* структур, полученных посредством ионной имплантации атомов аргона Ar^+ в *n*-GaAs, приведены на рисунках 3, *a* и *б*, (кривая 1). Параметры, полученные из фитинга экспериментальных характеристик (рисунок 3, *a* и *б*; кривая 2), приведены в таблице 3. Как следует из экспериментальных и рассчитанных темновых ВАХ и параметров полученных из них (таблица 1), в структурах имплантированных ионами Ar^+ наблюдается два механизма токопрохождения, соответствующие рекомбинационному, с диодным коэффициентом идеальности $A_r = 2$, и диффузионному с $A_d = 1$. Из рисунка 3 и таблицы 3 следует, что для смоделированной в программе структуры (рисунок 1, *б*) и экспериментально исследованной, *n*-типа GaAs (100) облучённого 2,5 кэВ ионами Ar^+ и флюенсом $F_i \sim 10^{15}$ см⁻², прямые темновые ВАХ (рисунок 3) и полученные данные (таблица 3) практически совпадают. Наличие рекомбинационного и диффузионного механизмов токопрохождения в облучённой и смоделированной структурах, подтверждают формирование в исследованных образцах низкоэнергетичными ионами *p-n* перехода с высокодефектным, наноразмерным фронтальным *p*-слоем толщиной ~ 8 нм.

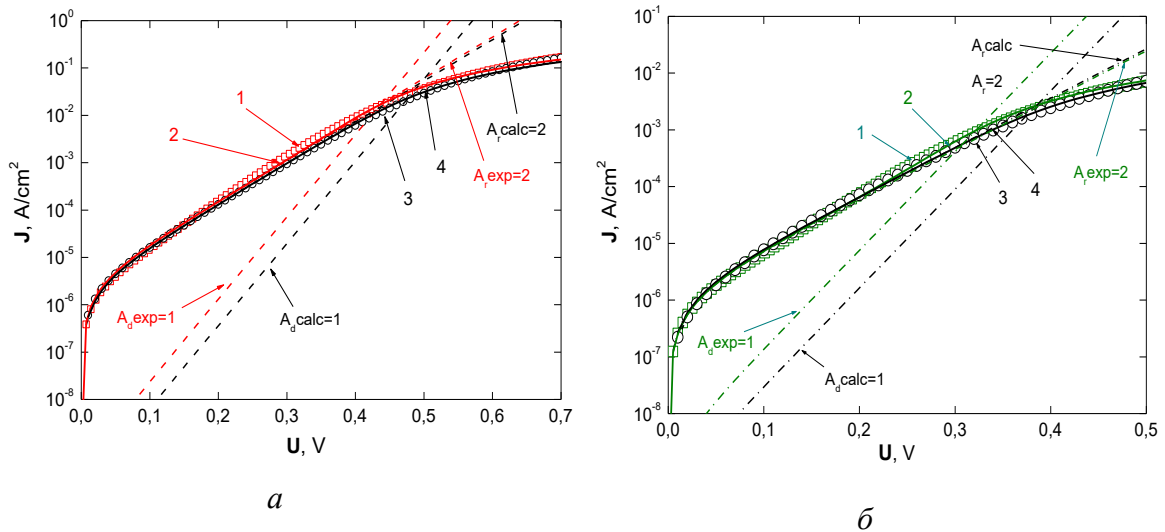


Рисунок 3. Прямые темновые ВАХ образцов №1 и №2 имплантированной структуры: 1 – экспериментальные кривые; 2 – фиттинг экспериментальных характеристик; 3 – расчётные кривые с параметрами, приведёнными в таблицах 1 и 2; 4 – фиттинг, расчётных в программе ВАХ.

Таблица 3. Параметры, полученные из фиттинга экспериментальных и рассчитанных характеристик

Образец №	A_r	$J_{or}, A/cm^2$	A_d	$J_{od}, A/cm^2$	$R_s, Ом \cdot см^2$
№1 эксперимент	2	$2,8 \cdot 10^{-6}$	1	$4,4 \cdot 10^{-10}$	1,4
№1 расчёт	2	$2,4 \cdot 10^{-6}$	1	$1,1 \cdot 10^{-10}$	1,4
№2 эксперимент	2	$1,1 \cdot 10^{-6}$	1	$2,5 \cdot 10^{-9}$	18
№2 расчёт	2	$1,2 \cdot 10^{-6}$	1	$5,5 \cdot 10^{-10}$	16

4. Заключение

В результате исследований структур n -GaAs, облучённых 2,5 кэВ ионами Ar^+ , можно сделать следующие выводы:

- бомбардировка ионами Ar^+ с энергией 2,5 кэВ и флюенсом $F_i \sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$ создаёт в n -GaAs p - n структуру с толщиной дефектного p -слоя ~ 8 нм;
- полученные из моделирования токи «насыщения» и диодные коэффициенты рекомбинационного и диффузионного механизмов токопрохождения подтверждают наличие в облучённых образцах мелкозалегающего p - n перехода в n -GaAs с высокодефектным наноразмерным фронтальным p -слоем.

В работе показана принципиальная технологическая возможность создания методом имплантации ионов Ar^+ с энергией 2,5 кэВ в n -GaAs планарных (2D) и в перспективе объёмных (3D) p - n наноструктур для микроэлектроники, интегральных схем и СВЧ электроники.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-19-01200-П).

Список литературы

1. Mikoushkin V. M. et al. The p-n junction formation effect of an Ar⁺ ion beam on the n-GaAs surface //EPL (Europhysics Letters). – 2018. – Т. 122. – №. 2. – С. 27002.
2. Mikoushkin V. M. et al. J–V Characteristic of p–n Structure Formed on n-GaAs Surface by Ar⁺ Ion Beam //Semiconductors. – 2019. – Т. 53. – №. 14. – С. 1922-1925.
3. Mikoushkin V. M. et al. The Diagram of p–n Junction Formed on the n-GaAs Surface by 1.5 keV Ar⁺ Ion Beam //Semiconductors. – 2020. – Т. 54. – №. 12. – С. 1702-1705.
4. Mikoushkin V. M., Makarevskaya E. A., Brzhezinskaya M. Effect of ion irradiation on GaAs core-level electron binding energies and band structure //Applied Surface Science. – 2021. – Т. 539. – С. 148273.
5. Silvaco Atlas User's Manual Device Simulation Software. [Электронный ресурс]. URL:http://ridl.cfd.rit.edu/products/Manuals/Silvaco/atlas_users.pdf (дата обращения 15.02.2021)
6. Ватюк А. А. Моделирование параметров гетероструктурного полевого транзистора в среде SilvacoTCAD //Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19. – №. 1.
7. Андреев В.М. и др. Токопрохождение и потенциальная эффективность (КПД) солнечных элементов на основе p-n переходов из GaAs и GaSb //Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43. – №. 5. – С. 671-678.