

УДК 537.311.4: 538.915: 538.971

ОСОБЕННОСТИ ОМИЧЕСКОГО КОНТАКТА С ИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫМ НАНОСЛОЕМ p -GaAs

© 2024 г. В. М. Микушкин^{а, *}, Е. А. Маркова^а, Д. А. Новиков^а

^аФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021 Россия

*e-mail: V.Mikoushkin@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 06.01.2024 г.

После доработки 20.03.2024 г.

Принята к публикации 20.03.2024 г.

Исследованы свойства металлического контакта со слоем p -GaAs толщиной ~ 8 нм, индуцированным низкоэнергетическими ионами Ag^+ на пластине n -GaAs в результате конверсии типа проводимости ($n \rightarrow p$). Металл наносили по стандартной технологии на поверхность полупроводника p -GaAs со слоем естественного оксида, частично восстановившимся при перемещении образца в напылительную установку. Для предотвращения металлизации нанослой контакт не отжигали. Поэтому на границе раздела возникал барьер Шоттки и сохранялся остаточный оксидный слой. Тем не менее, вольт-амперные характеристики показали, что сформированный контакт является преимущественно омическим. Установлено, что высокая концентрация ионно-индуцированных дефектов радикально уменьшает ширину барьера Шоттки и обеспечивает туннелирование дырок и электронов валентной зоны полупроводника сквозь барьер в прямом и обратном направлениях соответственно. Показано, что ионная бомбардировка поверхности полупроводника p -GaAs позволяет получать омический контакт с любым металлом без отжига. Сделан вывод о том, что ионно-стимулированная модификация полупроводника и исключение отжига позволяют получать туннельный омический контакт с предельно тонким (~ 10 нм) нанослоем полупроводника p -GaAs, покрытым остаточным слоем естественного оксида.

Ключевые слова: ионное облучение, модификация поверхности, пучок ионов Ag^+ , омический контакт, p -GaAs, барьер Шоттки, вольт-амперная характеристика, длина волны де-Бройля, туннелирование электронов, туннелирование дырок.

DOI: 10.31857/S1028096024100036, **EDN:** SHPRXP

ВВЕДЕНИЕ

Известные технологии формирования омических контактов полупроводниковых систем включают отжиг, который необходим для стимулирования диффузии и создания промежуточного слоя, удовлетворяющего условиям формирования омического контакта [1, 2]. Однако при создании приборов с использованием тонких слоев полупроводника отжиг приводит к их металлизации, а исключение отжига ключевым образом влияет на основные характеристики приборов из-за формирования в контактах барьера Шоттки [1]. К числу новых объектов размером от единиц

до десятков нанометров, к которым невозможно применить стандартные технологии формирования омических контактов с отжигом, относится планарный p – n -переход, образуемый на поверхности n -GaAs низкоэнергетическими ионами Ag^+ вследствие ионно-индуцированной конверсии типа проводимости ($n \rightarrow p$) приповерхностного слоя [3]. Изменение типа проводимости происходит под действием ионов в результате преимущественного распыления атомов мышьяка, обогащения облученного слоя галлием и образования положительно заряженных центров замещения позиции мышьяка галлием (Ga antisite defect) [4]. Аналогичную конверсию проводимости наблю-

дали и при облучении n -GaAs низкоэнергетическими ионами азота [5]. Толщина образуемого p -слоя составляет около 10 нм при энергии ионов 2.5–3.0 кэВ. При увеличении энергии толщина слоя увеличивается. Модифицированный слой на подложке n -типа, образует p – n -переход. Металлические контакты, нанесенные на ионно-индуцированный p – n -переход для исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ), не отжигали из-за неизбежной металлизации тонкого p -слоя. Тем не менее, темновые ВАХ образцов обнаружили диодный эффект [6]. Анализ ВАХ показал, что наблюдаемый диодный эффект обусловлен сформированным p – n -переходом, а не контактами, содержащими барьеры Шоттки из-за отсутствия отжига [6]. Однако причины, по которым нестандартные контакты носят омический характер, оставались неясными.

Целью настоящей работы было выяснение механизма токопрохождения через контакт с нанослоем p -GaAs и оценка возможности получения омического контакта с нанослоями полупроводников p -типа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Исследование ВАХ ионно-индуцированной наносистемы с p – n -переходом, с неотожженными контактами было описано в работе [6]. Для независимого изложения настоящего исследования приведем основные сведения об этом эксперименте. Для создания p – n -перехода пластину n -GaAs ($n \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$) облучили пучком ионов Ar^+ с энергией $E_i = 2500 \text{ эВ}$ и флуенсом $Q \sim 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в сверхвысоком вакууме ($\sim 5 \times 10^{-10}$ Торр) электронного спектрометра Leybold-AG. Флуенс пучка был достаточен для удаления слоя естественного оксида и модификации приповерхностного слоя полупроводника толщиной d . В работе [6] было показано, что слой толщиной d приобретает проводимость p -типа, и, таким образом, формирует p – n -переход. Иллюстрация процесса получения системы с p – n -переходом ионной бомбардировкой и распределение (профиль) концентрации точечных дефектов в ионно-модифицированном слое приведены на рис. 1а и 1б соответственно.

Время, необходимое для перемещения полученной системы в напылительную установку, было достаточным для восстановления оксидного слоя. Поэтому перед нанесением металлических контактов в высоковакуумной камере установки ($\sim 5 \times 10^{-7}$ Торр) образцы подвергли химическому травлению и промывке, после чего переместили в камеру в течение нескольких минут, за которые

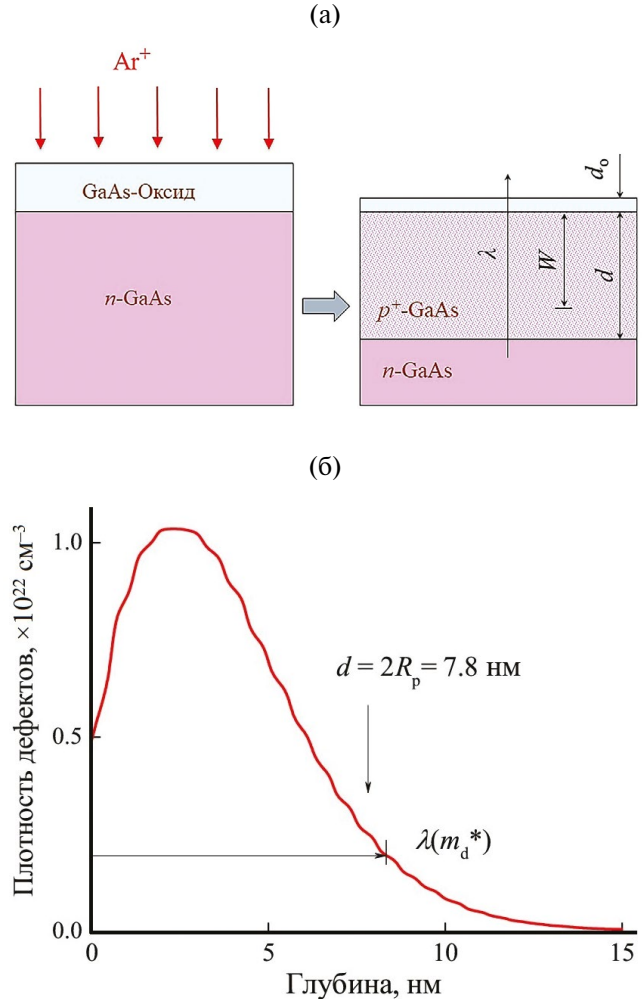


Рис. 1. Схема формирования p – n перехода на поверхности пластины n -GaAs под действием пучка ионов Ar^+ (а). Здесь λ — длина волны де Бройля электрона вершины валентной зоны; W — ширина барьера Шоттки; d_0 — толщина частично восстановившегося слоя естественного оксида; d — толщина ионно-модифицированного слоя. Профиль распределения точечных дефектов, образующийся при бомбардировке GaAs ионами Ar^+ с энергией $E_i = 2500 \text{ эВ}$ и флуенсом $Q \sim 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (б). Толщина ионно-модифицированного слоя $d = 2R_p \sim 8 \text{ нм}$, где проекционная глубина R_p соответствует максимуму плотности имплантированных ионов.

оксидный слой восстановился лишь частично. Это позволило уменьшить толщину слоя естественного оксида с обычных 2–3 нм [7–9] до $d_0 = 0.5 \text{ нм}$ [8]. Контакты наносили на лицевую (AgMn-Ni-Au) и обратную (AuGe-Ni-Au) стороны образцов по известной технологии [10]. Для предотвращения металлизации тонкого p -слоя образцы не отжигали. Поэтому полученные контакты, формально, не были омическими, а представляли собой контакты Шоттки. Тем не менее темновые ВАХ опытных образцов с

неотожженными контактами обнаружили диодный эффект, при котором отношение прямого тока к обратному достигало трех порядков в области напряжений до 0.7 В, превышающей рабочую область обычных Шоттки диодов. В то же время прямая и обратная ветви ВАХ контрольного образца были симметричны и линейны при напряжении более 0.1 В. Эти факты свидетельствовали о преимущественно омическом характере контактов и обусловленности диодного эффекта сформированным p – n -переходом, а не контактами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При нанесении металлического контакта AgMn–Ni–Au на p -GaAs без отжига формируется барьер Шоттки, высота которого определяется разностью работы выхода металла (ϕ_m (Mn) = 3.76–3.95 эВ) и энергии сродства к электрону полупроводника (χ_s (GaAs) = 4.07 эВ [1, 11]): $\Delta\phi_{ms} = \phi_m - \chi_s = - (0.1–0.3)$ эВ. Из-за остаточного оксидного слоя и высокой плотности поверхностных состояний высота барьера Шоттки может достигать еще большего значения $\Delta\phi_{ms} = 0.5$ эВ [1], которое и было использовано в анализе.

Омический характер контактов, рассматриваемых в настоящей работе, может быть объяснен туннелированием носителей тока сквозь барьер Шоттки. Этот процесс особенно важен для контакта на p -нанослое из-за недопустимости его отжига, поскольку контакт на толстой n -пластине может быть приготовлен заранее по стандартной технологии. Рассмотрим механизм туннелирования носителей тока сквозь барьер Шоттки на p -слое. Его энергетическая диаграмма схематически показана на рис. 2 в исходном состоянии и при подаче обратного напряжения на широкий и узкий барьеры. В случае обычного широкого барьера (рис. 2а, 2б) реализуется диод Шоттки на полупроводнике p -типа. При прямом включении (отрицательный потенциал на металле) барьер уменьшается, и дырочный ток экспоненциально возрастает. При обратном включении (рис. 2б, положительный потенциал на металле) высота и ширина барьера увеличиваются, и незначительный обратный ток определяется низкой концентрацией неосновных носителей. Соответствующая ВАХ схематически показана справа от диаграммы. В то же время, прямое и обратное направления для p – n -перехода прямо противоположны: прямое соответствует положительному потенциалу на металлическом контакте, а обратное — отрицательному. Поэтому можно сделать однозначный вывод о том, диодный эффект, который наблюдали в работе [6], обусловлен p – n переходом, а не контактом, так как экспонен-

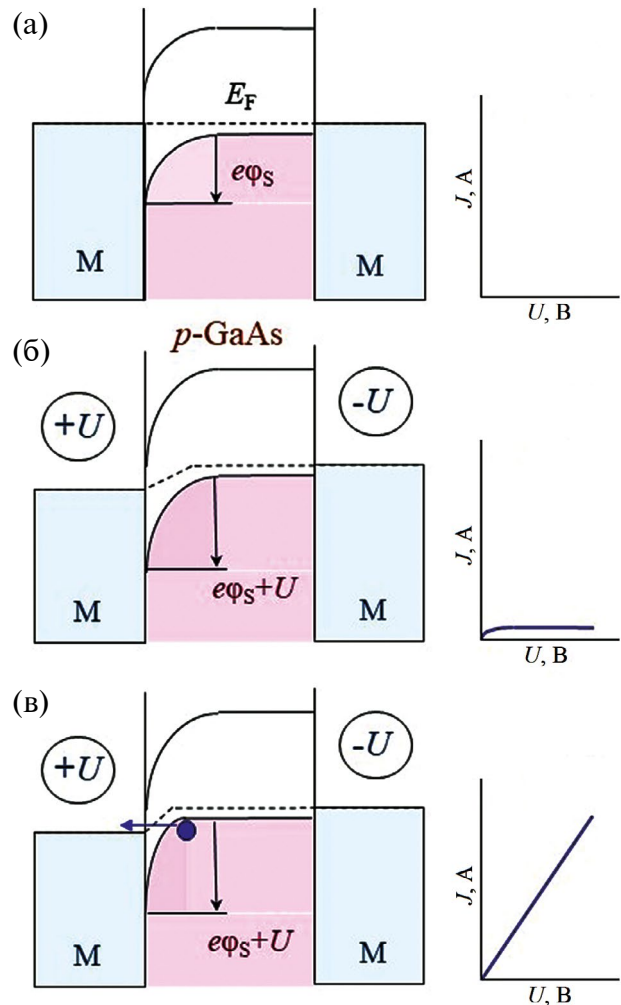


Рис. 2. Слева — энергетическая диаграмма широкого (а, б) и узкого (в) барьеров Шоттки на p -GaAs в исходном состоянии (а) и при подаче обратного напряжения (б, в); металлический контакт справа — омический. Справа — схематичное изображение соответствующих ВАХ.

циальный рост тока наблюдали при включении, которое является прямым для p – n -перехода, а не контакта Шоттки. Следовательно, нанесённые контакты были преимущественно омическими.

Рассматриваемый барьер становится прозрачным, а контакт омическим, если его ширина мала по сравнению с длиной волны де Бройля дырок и электронов вершины валентной зоны (ВЗ) полупроводника. Рис. 2в иллюстрирует туннелирование электрона валентной зоны, которому соответствует линейная ВАХ. Аналогично сквозь узкий барьер туннелируют дырки, но при прямом включении (отрицательный потенциал на металле). Таким образом, туннельное прохождение тока сквозь барьер в прямом и обратном направлениях обеспечивают дырки и электроны полупроводни-

ка соответственно. Поэтому при выбранной для анализа максимально возможной высоте барьера Шоттки условия туннелирования сквозь контакт с любым металлом на полупроводнике p -типа определяются свойствами носителей тока полупроводника, а не металла. На рис. 1а схематически показаны необходимые для туннелирования носителей тока соотношения между толщиной ионно-модифицированного слоя d , шириной барьера Шоттки W , длиной волны де Бройля электрона вершины валентной зоны и толщиной частично восстановившегося слоя естественного оксида d_o : $\lambda > W + d_o$, $d > W$. Для ответа на вопрос о туннельном характере контактов в анализируемом эксперименте необходимо определить действительные величины указанных параметров.

В работе [4] было показано, что толщина ионно-модифицированного p -слоя равна полной ширине на половине высоты максимума ($FWHM$) распределения (профиля) концентрации имплантированных ионов аргона $d \sim FWHM \sim 2R_p \sim 8$ нм, где R_p — проекционная глубина, соответствующая максимальной концентрации имплантированных ионов и рассчитанная с помощью программы TRIM [12]. На рис. 1б показан профиль распределения пар точечных дефектов, междоузельных атомов и вакансий, образующихся при бомбардировке GaAs ионами Ar^+ с энергией $E_i = 2500$ эВ и флуенсом $Q \sim 1 \times 10^{14}$ см $^{-2}$. Профиль дефектов также рассчитан с помощью программы TRIM. Видно, что на глубине d плотность дефектов падает на половину порядка.

Полную ширину барьера W и зависимость величины потенциала V от глубины его проникновения x (профиль барьера) можно рассчитать по известным формулам [13]:

$$W = (2\epsilon_s \epsilon_0 \Delta\phi_{ms} / qN_D)^{1/2},$$

$$V(x) = qN_D (W - x)^2 / 2\epsilon_s \epsilon_0, \quad (1)$$

где q — заряд носителя тока; x — расстояние от границы раздела сред; N_D — плотность зарядов (для легированного полупроводника — плотность ионизованных акцепторов); ϵ_s — диэлектрическая проницаемость полупроводника; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная; $\Delta\phi_{ms} = \phi_m - \chi_s$ — разность между работой выхода металла и энергией сродства к электрону полупроводника, определяющая высоту барьера Шоттки. При $x = W$ электрическое поле в полупроводнике равно нулю.

В легированном полупроводнике p -типа ширина барьера W (или глубина проникновения электрического поля в полупроводник) определяется плотностью акцепторов N_D , которые при комнат-

ной температуре заряжены. В радиационно-модифицированном полупроводнике GaAs ширина W задается плотностью положительно заряженных дефектов N_s [4, 14–17], которая на порядки превосходит плотность легирующей примеси исходной пластины. Приведенный на рис. 1б профиль плотности точечных дефектов для флуенса $Q \sim 1 \times 10^{14}$ см $^{-2}$ указывает на их исключительно высокую плотность (1×10^{22} см $^{-3}$), сопоставимую с атомной плотностью GaAs (4.42×10^{22} см $^{-3}$). В эксперименте при более высоком флуенсе [6] ($Q \sim 1 \times 10^{15}$ см $^{-2}$) расчет с помощью TRIM дает полную аморфизацию материала. Однако следует заметить, что в TRIM при большем флуенсе не учтено перекрытие ионных каскадов, которое усиливает рекомбинацию френкелевских пар. И действительно, в исследовании резерфордовского рассеяния на GaAs, облученном ионами N^+ с энергией 250 кэВ, было установлено насыщение степени аморфизации на уровне $\sim 50\%$ [18]. Поэтому для оценки плотности дефектов, усредненной по модифицированному слою ($N_s \sim 1 \times 10^{22}$ см $^{-3}$), был использован профиль плотности дефектов, соответствующий пятидесятипроцентной степени аморфизации материала. При большей аморфизации барьер Шоттки может быть только уже. В соответствии с формулами (1) оценка сверху для ширины барьера Шоттки на модифицированном p -слое дает $W = 0.3$ нм. Столь малая величина, сопоставимая с межатомным расстоянием, по-видимому, выходит за область применимости формул (1). Но она определяет ширину барьера, которая с запасом удовлетворяет условию омичности контакта ($\lambda > W$), рассмотренному ниже.

Для оценки длины волны де Бройля (λ) дырок и электронов полупроводника, обеспечивающих туннельный ток в прямом и обратном направлениях соответственно, была использована классическая формула:

$$\lambda = h/p = h/(2m^*E)^{1/2}, \quad (2)$$

где h — постоянная Планка; p , m^* и E — импульс, эффективная масса и кинетическая энергия частицы. Эффективные массы дырок и электронов валентной зоны считали равными, поскольку они определяются одной дисперсионной кривой вблизи точки Г зоны Бриллюэна. Учитывая высокую степень аморфизации ионно-модифицированного слоя, за эффективную массу дырок и электронов валентной зоны принимали массу плотности состояний, которая близка к эффективной массе тяжелых дырок: $m_d^* = (m_h^{*3/2} + m_h^{*3/2})^{2/3} = 0.53m_0 \sim m_h$ [19], где m_0 , $m_h = 0.51m_0$ и $m_h = 0.081m_0$ — эффективные массы свободного электрона, тяже-

лой и легкой дырок в GaAs соответственно. Вклад легких частиц незначителен из-за их малой плотности состояний. Расчет энергетического распределения дырок [20] показывает, что их средняя кинетическая энергия не превышает $E_H = 0.1$ эВ, а соответствующая длина волны составляет $\lambda_H = 8$ нм. Кинетическая энергия электронов валентной зоны (E_e), участвующих в туннелировании, зависит от напряжения на контакте при обратном включении: чем больше напряжение, тем более глубокие состояния вовлекаются в процесс туннелирования в более высокой и узкой части барьера. Учитывая максимальную высоту барьера ($V = -0.5$ эВ), кинетическая энергия туннелирующих электронов может достигать величины $E_e = 0.5$ эВ. Усредненная длина волны де Бройля туннелирующих электронов равна $\lambda(m_e^*) = 3$ нм. Свойства контакта определяет длина волны электронов валентной зоны $\lambda(m_e^*) = 3$ нм, как меньшая из длин носителей тока. Контакт оказывается преимущественно омическим, поскольку длина волны электрона с большим запасом превосходит оценку суммарной ширины барьера Шоттки и остаточного оксидного слоя ($W + d_o = 0.3 + 0.5 = 0.8$ нм).

Металлический контакт со слоем полупроводника p -GaAs может быть омическим и при значительно меньшей плотности радиационно-индуцированных дефектов и, соответственно, меньших дозах облучения. На рис. 3 показан расчетный профиль барьера Шоттки на ионно-модифицированном слое p -GaAs, по ширине равный всему радиационно-модифицированному слою полупроводника $W = 2R_p \sim 8$ нм. Такая ширина барьера соответствует плотности дефектов $N_s = 0.7 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, которая достигается при небольшом флуенсе $Q \sim 1.5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ионов Ag^+ с энергией 2500 эВ. Несмотря на малый флуенс, плотность дефектов $N_s \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ на порядок и более превосходит уровень легирования ($10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$) коммерческих пластин, что соответствует типу сильно легированных полупроводников. С учетом положительного заряда дефектов GaAs, модифицированного ионами Ag^+ [4], даже их относительно малая плотность ($N_s \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$) задает p -тип проводимости ионно-модифицированного слоя. На рис. 3 профиль барьера сравнен с длиной волны де Бройля дырок ($\lambda_H \sim 8$ нм) и электронов валентной зоны ($\lambda_e \sim 3$ нм). Длины волн де-Бройля соответствуют длинам стрелок. Видно, что длина волны дырок равна полной ширине барьера, а электроны могут эффективно проходить сквозь барьер на половине его высоты. Следовательно, металлический контакт со слоем радиационно-модифицированного

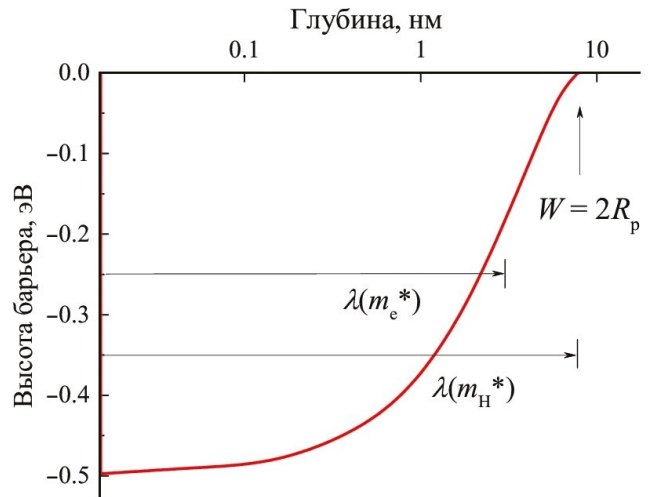


Рис. 3. Профиль барьера Шоттки на ионно-модифицированном слое p -GaAs в сравнении с длиной волны де Бройля дырок ($\lambda_H \sim 8$ нм) и электронов валентной зоны ($\lambda_e \sim 3$ нм). Полная ширина барьера $W = d = 2R_p \sim 8$ нм, плотность дефектов $N_s = 0.7 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Напряжение на контакте $U = 0$.

полупроводника p -GaAs становится омическим при относительно невысокой плотности дефектов $N_s \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$, достигаемой при очень малых дозах ионов Ag^+ низких энергий.

Таким образом, ток сквозь барьер на полупроводнике p -типа в обоих направлениях формируют дырки и электроны полупроводника с относительно длинной волной де Бройля в области вершины валентной зоны. Барьер Шоттки, сформированный любым металлом на ионно-индуцированном нанослое p -GaAs, оказывается прозрачным в обоих направлениях вследствие его исключительно малой ширины, обусловленной относительно высокой плотностью дефектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный в настоящей работе анализ позволил объяснить ранее наблюдавшийся квазиомический характер металлического контакта на ионно-индуцированном p -нанослое p - n -перехода, полученном на n -GaAs пластине облучением низкоэнергетическими ионами Ag^+ . Особенностью формирования контакта было исключение отжига, что позволило избежать металлизации предельно тонкого p -слоя, но привело к формированию барьера Шоттки и сохранению остаточного слоя естественного оксида. Однако высокая концентрация дефектов ионно-индуцированного p -слоя обусловила исключительно малую ширину барьера Шоттки и его прозрачность для дырок и электронов валентной зоны полупроводника,

обеспечивающих ток с линейной ВАХ в прямом и обратном направлениях. Таким образом, в работе установлена возможность “холодного” формирования омического контакта с предельно тонкими слоями полупроводников p -типа с помощью ионной бомбардировки. Показано, что для формирования омического контакта с p -GaAs требуется относительно малая доза (10^{11} – 10^{12} см $^{-2}$) облучения низкоэнергетическими ионами Ar^+ . Преимуществом такого подхода является возможность формирования омического контакта на полупроводнике с остаточным слоем естественного оксида, который возникает в большинстве технологий нанесения металлических контактов, но не может быть устранен отжигом в случае систем с тонкими слоями. Привлекательность способа получения ионно-индуцированной p – n структуры с описанными контактами обусловлена тем, что такая структура может быть создана в сверхчистых вакуумных условиях без использования “мокрой” литографии и дорогостоящей гермозоны. Латеральные размеры элементов поверхностной структуры, определяются диаметром ионного пучка.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baca A.G., Ashby C.I.H. Ohmic contacts. // *Fabrication of GaAs Devices*. London, UK: IET, 2005. P. 179.
2. Blank T.V., Gol'dberg Yu.A. // *Semiconductors*. 2007. V. 41. P. 1263.
<https://doi.org/10.1134/S1063782607110012>
3. Mikoushkin V.M., Bryzgalov V.V., Nikonov S.Yu., Solonitsyna A.P., Marchenko D.E. // *EPL*. 2018. V. 122. P. 27002.
<https://doi.org/10.1209/0295-5075/122/27002>
4. Mikoushkin V.M., Makarevskaya E.A., Brzhezinskaya M. // *Appl. Surf. Sci.* 2021. V. 539. P. 148273.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148273>
5. Mikoushkin V.M., Makarevskaya E.A., Marchenko D.E. // *Appl. Surf. Sci.* 2022. V. 577. P. 151909.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151909>
6. Макаревская Е.А., Новиков Д.А., Микушкин В.М., Калиновский В.С., Контрош Е.В., Толкачев И.А., Прудченко К.К. // *Поверхность: Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед.* 2022. Т. 10. С. 81.
<https://doi.org/10.31857/S1028096022100107>
7. Surdu-Bob C.C., Saied S.O., Sullivan J.L. // *Appl. Surf. Sci.* 2001. V. 183. P. 126.
[https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(01\)00583-9](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(01)00583-9)
8. Feng L., Zhang L., Liu H., Gao X., Miao Z., Cheng H.C., Wang L., Niu S. Characterization study of native oxides on GaAs(100) surface by XPS. // *Proc. SPIE. Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging*, Beijing, China. 2013. V. 8912. P. 89120N.
<https://doi.org/10.1117/12.2033679>
9. Mikoushkin V.M., Bryzgalov V.V., Makarevskaya E.A., Solonitsyna A.P., Marchenko D.E. // *Semiconductors*. 2018. V. 52. P. 2057.
<https://doi.org/10.1134/S1063782618160194>
10. Малевская А.В., Калиновский В.С., Ильинская Н.Д., Малевский Д.А., Контрош Е.В., Шварц М.З., Андреев В.М. // *ЖТФ*. 2018. Т. 88. P. 1211.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2018.08.46311.2591>
11. Haynes W.M. // *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 95th ed. London: CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, 2014. 2704 p.
<https://doi.org/10.1201/b17118>
12. Ziegler J.F., Manoyan J.M. // *Nucl. Instr. Meth. B*. 1988. V. 35. P. 215.
[https://doi.org/10.1016/0168-583X\(88\)90273-X](https://doi.org/10.1016/0168-583X(88)90273-X)
13. Streetman B.G., Banerjee S.K. *Junctions*. // *Solid State Electronic Devices*. 6th ed., Upper Saddle River, New York: Prentice-Hall, 2006. P. 154.
14. Swaminathan V. // *Bull. Mater. Sci.* 1982. V. 4. P. 403.
<https://doi.org/10.1007/BF02748739>
15. Puska M.J. // *J. Phys.: Condens. Matter*. 1989. V. 1. P. 7347.
<https://doi.org/10.1088/0953-8984/1/40/010>
16. Kuriyama K., Yokoyama K., Tomizawa K., Takeuchi T., Takahashi H. // *Appl. Phys. Lett.* 1992. V. P. 843.
<https://doi.org/10.1063/1.107763>
17. Hurle D.T.J. // *J. Appl. Phys.* 2010. V. 107. P. 121301.
<https://doi.org/10.1063/1.3386412>
18. Соболев Н.А., Бер Б.Я., Казанцев Д.Ю., Калядин А.Е., Карабешкин К.В., Микушкин В.М., Сахаров В.И., Серенков И.Т., Шек Е.И., Шерстнев Е.В., Шмидт Н.М. // *Письма ЖТФ*. 2018. Т. 44. С. 44.
<https://doi.org/10.21883/PJTF.2018.13.46326.17139>
19. Kittel C. // *Introduction to solid state physics* (8th ed.). New Jersey: Wiley, 2013. P. 680.
[https://kittel.pdf\(elte.hu\)](https://kittel.pdf(elte.hu))
20. Sze S.M. *Physics of semiconductor devices*. New York: John Wiley&Sons. 1981. P. 815.
<https://doi.org/10.1002/0470068329>

Features of Ohmic Contact with an Ion-Induced *p*-GaAs nanolayer

V. M. Mikoushkin^{1, *}, E. A. Markova¹, D. A. Novikov¹

¹*Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021 Russia*

**e-mail: makareka@mail.ru*

The properties of a metal contact with a *p*-GaAs layer ~8 nm thick induced by low-energy Ar⁺ ions on an *n*-GaAs wafer as a result of the conduction type conversion have been studied. The metal was deposited according to the standard technology on the surface of the semiconductor *p*-GaAs with a natural oxide layer, partially restored when the sample was transferred to a deposition setup. To prevent metallization of the nanolayer, the contact was not annealed. Therefore, a Schottky barrier emerged at the interface and a residual oxide layer retained. However, current-voltage characteristics showed that the formed contact is predominantly ohmic. It has been found that a high concentration of ion-induced defects radically reduces the width of the Schottky barrier and ensures the tunneling of holes and electrons of the semiconductor valence band through the barrier in the forward and reverse directions, respectively. It is shown that ion bombardment of the *p*-GaAs semiconductor surface makes it possible to obtain an ohmic contact with any metal without annealing. It is concluded that the ion-stimulated modification of the semiconductor and the exclusion of annealing make it possible to obtain a tunnel ohmic contact with an extremely thin *p*-GaAs nanolayer coated with a residual layer of natural oxide.

Keywords: ion irradiation, surface modification, Ar⁺ ion beam, ohmic contact, *p*-GaAs, Shottky barrier, current-voltage characteristic, de Broglie wavelength, electron tunneling, hole tunneling.