

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.3.2>

УДК: 538.913

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА Au-GaAs ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ИСПАРЕНИИ ЗОЛОТА В ВАКУУМЕ

Т.А. Брянцева¹, Ю.В. Гуляев², В.Е. Любченко¹, И.А. Марков¹, Ю.А. Тен¹¹ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
141190, Фрязино, пл. Введенского, 1² ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7

Статья поступила в редакцию 16 января 2023 г.

Аннотация. В настоящей работе исследована зависимость процесса формирования границы раздела металл-полупроводник от способа подготовки поверхности арсенида галлия перед осаждением пленки золота методом термического испарения в вакууме. Показано, что по сравнению с известной методикой финишной отмывки, основанной на использовании деионизованной воды, использование специально подготовленной безреагентно модифицированной воды (БМВ) позволяет существенно улучшить качество контактов Au-GaAs. Результат достигается за счет выпадения из водного раствора (БМВ) элементов слоя природного оксида GaAs на поверхность полупроводника с образованием нового свободного от оксидов нанослоя арсенида галлия. Обработка в деионизованной воде сдвигает реакцию к формированию на поверхности слоя Ga₂O₃.

Ключевые слова: безреагентно модифицированная вода, арсенид галлия, оксиды, выпрямляющие и невыпрямляющие контакты.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН №122041900056-0.

Автор для переписки: Марков Игорь Александрович, iam176@fireras.su

Введение

Известно, что состояние поверхности материалов на атомарном и субатомарном уровнях в значительной степени определяет результаты процесса изготовления полупроводниковых приборов и их эксплуатационные характеристики [1,2]. Для достижения стабильности и воспроизводимости характеристик приборов на основе арсенида галлия одной из задач является подготовка поверхности полупроводника перед проведением запланированных технологических процессов, таких как нанесение металлических покрытий, создание эпитаксиальных структур и др. Подготовка поверхности арсенида галлия перед осаждением пленки металла является неотъемлемой частью технологии изготовления диодов с барьером Шоттки, диодов Ганна, полевых транзисторов и других приборов СВЧ электроники. В настоящей работе исследована роль финишной отмывки поверхности арсенида галлия в процессе создания тонкопленочных контактов Au-GaAs методом термического испарения золота в вакууме.

1. Методика исследования

Создание контактов металл-полупроводник путем термического испарения золота в вакууме широко используется в технологии изготовления приборов на основе арсенида галлия [3]. При этом подготовка поверхности полупроводника с целью очистки от оксидов производится путем травления в кислотных растворах с последующей нейтрализацией в деионизованной воде. Недостатком кислотного травления является то, что этот процесс не гарантирует формирования необходимого поверхностного слоя, свободного от кислородных соединений и сохраняющих уровень легирующих примесей. Роль финишной отмывки поверхности при создании контактов Au-GaAs исследовалась в работе [4], и было отмечено, что деионизованная вода, используемая обычно для промывания образцов после травления, обладает относительно высоким поверхностным натяжением и вязкостью. При нейтрализации кислоты (HCl), используемой для удаления слоя оксида, в составе водного раствора могут

оставаться ионы и молекулы растворенного оксида, а кроме того со стороны воздушной среды в ней могут растворяться газы: N_2 ; O_2 ; Ar; CO_2 ; He; H_2 . В результате на стадии слива водного раствора на поверхности GaAs остаются большие куполообразные капли, связанные с поверхностью за счет внутреннего давления со стороны молекул воды. Летучие компоненты, в частности арсин, покидают поверхность капель. Остаточную воду высушивают, что приводит, как правило, к выпадению осадка на поверхности образца GaAs в виде тонкого слоя оксида, состоящего из соединений галлия и мышьяка с кислородом и углеродом [4].

В упомянутой работе [4] предложено использовать в процессе отмывки поверхности GaAs специальным образом подготовленную безреагентно модифицированную воду [5-7], что позволяет создавать на стадии финишной обработки при комнатной температуре однородный мелкокристаллический нанослой GaAs, свободный от окислов. После обработки в безреагентно модифицированной воде (БМВ), в отличие от обработки в простой деионизованной воде, на поверхности GaAs образуется остаточная тонкая плоская пленка воды. Со временем щелочные свойства воды нейтрализуются, преобразуя ее в простую воду. На стадии перехода БМВ в простую воду происходит пересыщение по содержанию Ga^+ и As^- и, как следствие, к выпадению тонкого слоя соединения GaAs (мелкокристаллического) на поверхность подложки (рис. 2). Выращенный нанослой отличается однородностью на большой площади и обеспечивает создание выпрямляющего контакта [4].

В настоящей работе приводятся новые данные о роли БМВ в процессе финишной отмывки поверхности арсенида галлия при формировании контактов Au-GaAs, в частности, возможность создания омических контактов.

2. Результаты и обсуждение

Как правило, при создании невыпрямляющих (омических) контактов в качестве испаряемого металла обычно используется навеска золота с добавлением донорной примеси (германий). Перед осаждением золота осуществляется обработка поверхности GaAs с использованием кислотных растворов (например, используется концентрированный раствор HCl) с последующей нейтрализацией кислотного раствора в деионизованной воде и отжигом в вакууме. Известно, что в результате промывания в деионизованной воде на поверхности GaAs формируется тонкий слой оксида Ga_2O_3 [4]. В дальнейшем в результате отжига в вакууме при температуре $T \sim (450-500)^\circ C$ на поверхности арсенида галлия осуществляется реакция взаимодействия в системе Au-Ga-GaAs, и образуются фрагментированные островки перекристаллизованного сильно легированного арсенида галлия n-типа, покрытые металлом [3]. Для того, чтобы создать контакт значительной площади (более 1 мм^2) приходится дополнительно покрывать его слоем металла.

Для исследования возможности создания невыпрямляющих (омических) контактов в настоящей работе использовались эпитаксиальные структуры, аналогичные исследованным в [4] (рис. 1).

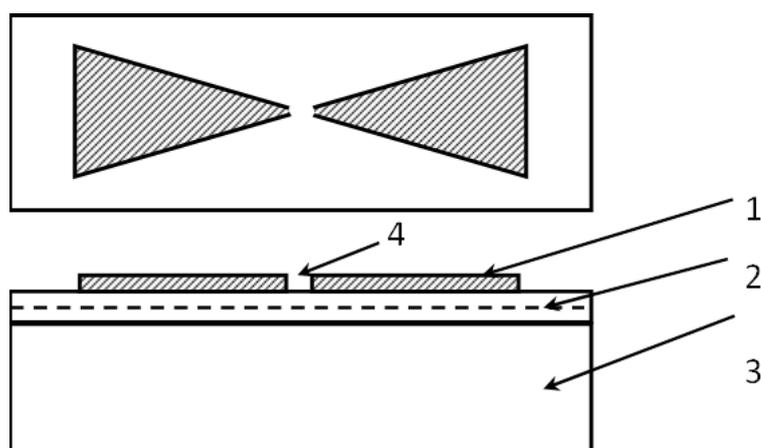


Рис. 1. Микрополосковая антенна в виде пленки золота на поверхности эпитаксиальной $n-i$ структуры из арсенида галлия: 1) контактный слой Au; 2) n – слой; 3) подложка из полуизолирующего i -GaAs; 4) зазор между контактами

До осаждения слоя золота поверхность (100)GaAs обрабатывалась в концентрированной HCl с нейтрализацией в БМВ и с последующим отжигом в вакууме при $T \sim 550^\circ\text{C}$, 2 мин. Показано, что осаждение пленки Au, толщиной $\sim 500\text{\AA}$, при комнатной температуре подложки ($T \sim 20^\circ\text{C}$) дает возможность получения однородных омических контактов без последующего отжига.

На рис. 2 приведена вольтамперная характеристика (ВАХ) исследуемого образца. При этом пленка золота блестящая и обладает хорошей адгезией. Добавление донорной примеси в испаряемый металл не требуется. Это существенно облегчает задачу создания омических контактов и может быть использовано на практике.

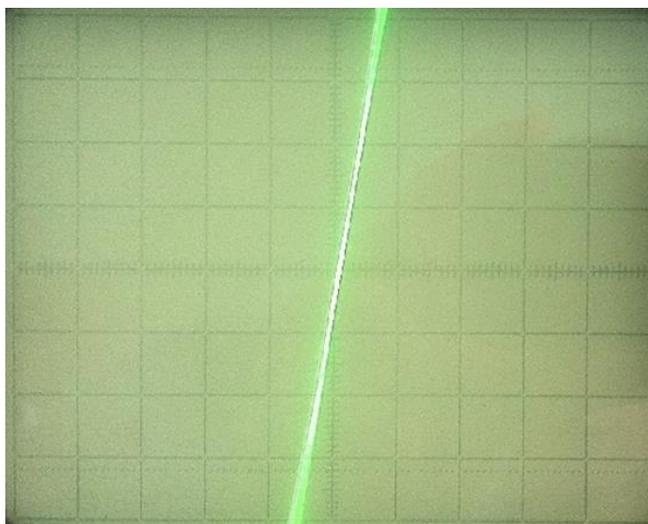


Рис. 2. ВАХ образца Au ($d \sim 500\text{\AA}$) - GaAs: обработка в концентрированной HCl + H₂O_{БМВ}. Экран прибора Л2-56, цена деления: по горизонтали 0.5 В, по вертикали 0.2 мА

Для сравнения на рис. 3 показана ВАХ образца, полученная в результате такой же технологической последовательности, но с использованием обычной деионизованной воды для нейтрализации раствора HCl.

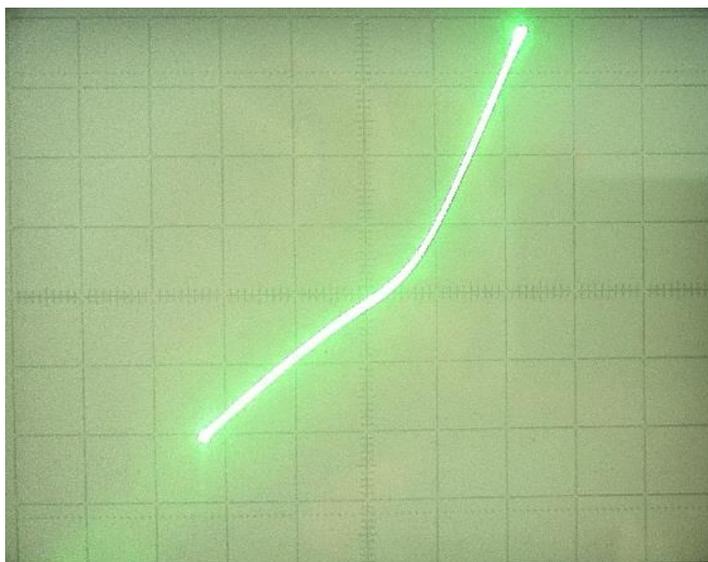


Рис. 3. ВАХ образца Au ($d \sim 500 \text{ \AA}$) - GaAs: обработка в концентрированной HCl + H₂O (деионизованная вода). Экран прибора Л2-56, цена деления: по горизонтали 0.5 В, по вертикали 0.2 мА

Как следует из рис. 3, использование деионизованной воды в этом случае приводит к формированию плохого барьера Шоттки. Пленка золота при осаждении на подложку при температуре комнаты обладает плохой адгезией и легко отделяется.

Результаты измерения ВАХ указывают на различия в формировании границ раздела в тонкопленочной структуре Au-GaAs.

В случае использования БМВ для финишной отмытки поверхности арсенида галлия результатом является формирование наноразмерной мелкокристаллической пленки GaAs, свободной от оксида, на поверхности исходного арсенида галлия по типу изображенной на рис. 4.

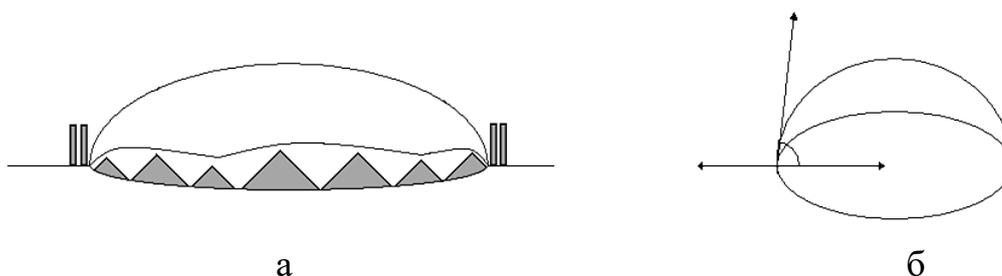


Рис. 4. Схематическое изображение поверхности GaAs: а – приграничные слои в системе капля H₂O_{БМВ}-GaAs, б – распределение межфазной энергии на границе H₂O_{БМВ} – GaAs

Отсутствие слоя оксида и выпадение тонкого слоя мелкокристаллического арсенида галлия приводят к упрочнению границ GaAs нанослой – GaAs и к деформационной стабильности микроструктур Au-GaAs.

Заключение

На примере осаждения пленки металла (Au) путем термического испарения в вакууме показано, что благодаря использованию БМВ в процессе подготовки поверхности подложки (GaAs) в результате предварительного отжига подложки и последующего осаждения пленки золота путем термического испарения в вакууме формируются низкоомные невыпрямляющие (омические) контакты. Есть основания предполагать, что способ подготовки поверхности GaAs с использованием БМВ может быть использован и в других технологических процессах, связанных с созданием микроструктур на основе арсенида галлия.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН №122041900056-0.

Литература

1. Черняев В.Н. *Физико-химические процессы в технологии РЭА*. Москва, Высшая школа. 1987. 375 с.
2. Барыбин А.А., Томилин В.И., Шаповалов В.И. *Физико-технологические основы макро-, микро- и нано-электроники*. Москва, Физматлит. 2011. 784 с.
3. Брянцева Т.А., Дворянкина Г.Г., Лебедева З.М., Петров А.Г., Соколова Е.Б., Юневич Е.О. Взаимодействие золота с приповерхностным слоем арсенида галлия. *Неорганические материалы*. 1986. Т.22. №9. С.1421-1424.
4. Брянцева Т.А., Гуляев Ю.В., Любченко В.Е., Марков И.А., Тен Ю.А. Влияние финишной обработки поверхности GaAs на свойства границ раздела Au–GaAs. *Радиотехника и электроника*. 2021. Т.66. №11. С.1-8.
<https://doi.org/10.1134/s1064226921110012>

5. Патент РФ №2476383. Еремин С.М., Марков И.А., Тен Ю.А. *Способ активации воды*. Дата заявки: 16.06.2008. Дата публикации: 27.02.2013. 13 с.
6. Gulyaev Yu.V., Markov I.A., Ten Yu.A. Reagentless Modified Water and its Biological Activity. *Physics of Wave Phenomena*. 2020. V.28. №2. P.98-102. <https://doi.org/10.3103/S1541308X20020065>
7. Гуляев Ю.В., Еремин С.М., Марков И.А., и др. Физико-химические свойства безреагентно-модифицированной воды и ее биологическая активность. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2005. №5.

Для цитирования:

Брянцева Т.А., Гуляев Ю.В., Любченко В.А., Марков И.А., Тен Ю.А. Особенности формирования границы раздела Au-GaAs при термическом испарении золота в вакууме. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.3.2>